

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FIN DE CARRERA**

# ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL BRONCE DEPENDIENDO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO



**E.U.I.T.I.Z.**

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

**NOMBRE DE ALUMNO**

MARÍA BRAVO LÁZARO

**ESPECIALIDAD**

MECÁNICA, ENERGÍAS Y FLUIDOS

**DIRECTOR DE PROYECTO**

MARÍA ANTONIETA MADRE SEDILES

**CONVOCATORIA**

MARZO 2011

<b>0</b>	<b><u>PRESENTACIÓN Y OBJETO DEL ESTUDIO</u></b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b><u>INTRODUCCIÓN AL BRONCE</u></b>	<b>7</b>
1.1	HISTORIA	8
1.2	BRONCE EN LA ACTUALIDAD	9
<b>2</b>	<b><u>PROPIEDADES DEL BRONCE</u></b>	<b>10</b>
2.1	FASES DEL BRONCE	10
2.2	PROPIEDADES MECÁNICAS	13
2.3	PÁTINA	14
2.4	COMPARACIÓN ENTRE BRONCES Y ACEROS	15
<b>3</b>	<b><u>TÉCNICA DE FUNDICIÓN</u></b>	<b>16</b>
3.1	OBTENCIÓN DEL BRONCE	17
3.1.1	COBRE	17
3.1.2	ESTAÑO	17
3.1.3	BRONCE	18
<b>4</b>	<b><u>TIPOS DE BRONCES</u></b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b><u>DEFORMACIÓN PLÁSTICA Y MECANISMOS DE AUMENTO DE LA RESISTENCIA</u></b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b><u>TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS BRONCES</u></b>	<b>25</b>
6.1	TEMPLES	25
6.2	RECOCIDO	28
6.2.1	RECOCIDO CONTRA ACRITUD	29
6.2.2	RECOCIDO DE HOMOGENEIZACIÓN	30
6.2.3	RECOCIDO DE ESTABILIZACIÓN	30
6.3	REVENIDOS	30

## **7 ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE CONSTITUCIÓN 32**

### **7.1 MUESTRAS 32**

### **7.2 ENSAYO ESTÁTICO DESTRUCTIVO DE PROPIEDADES MECÁNICAS: ENSAYO DE DUREZA 33**

#### **7.2.1 MÉTODO VICKERS 35**

### **7.3 ENSAYO DE CARACTERÍSTICAS DE CONSTITUCIÓN: ENSAYO METALOGRÁFICO 39**

#### **7.3.1 TÉCNICA OPERATIVA 40**

## **8 PARÁMETROS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS UTILIZADOS 46**

### **8.1 TEMPLES 47**

### **8.2 RECOCIDOS 48**

### **8.3 REVENIDOS 50**

## **9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS 52**

### **9.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE MICRODUREZA VICKERS 52**

#### **9.1.1 MUESTRA DE SUMINISTRO 52**

#### **9.1.2 TEMPLE 1 53**

#### **9.1.3 TEMPLE 2 53**

#### **9.1.4 TEMPLE 3 53**

#### **9.1.5 REVENIDO 1 53**

#### **9.1.6 REVENIDO 2 54**

#### **9.1.7 REVENIDO 3 54**

#### **9.1.8 REVENIDO 4 54**

#### **9.1.9 RECOCIDO DE ESTABILIZACIÓN 54**

#### **9.1.10 RECOCIDO CONTRA ACRITUD 55**

#### **9.1.11 RECOCIDO DE HOMOGENEIZACIÓN 55**

#### **9.1.12 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES RESULTADOS 55**

### **9.2 MICROGRAFÍAS OBTENIDAS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO 58**

#### **9.2.1 MUESTRA DE SUMINISTRO 59**

#### **9.2.2 TEMPLE 1 61**

#### **9.2.3 TEMPLE 2 62**

9.2.4	TEMPLE 3	64
9.2.5	REVENIDO 1	65
9.2.6	REVENIDO 2	66
9.2.7	REVENIDO 3	68
9.2.8	REVENIDO 4	69
9.2.9	RECOCIDO DE ESTABILIZACIÓN	70
9.2.10	RECOCIDO CONTRA ACRITUD	72
9.2.11	RECOCIDO DE HOMOGENEIZACIÓN	74

---

<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>76</b>
-----------	---------------------	-----------

---

<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN</b>	<b>77</b>
-----------	-------------------------------------	-----------

## **0 Presentación y objeto del estudio**

Este trabajo está enfocado a la investigación de las transformaciones que suceden en el bronce sometido a diferentes tratamientos térmicos cuyo fin es mejorar sus propiedades mecánicas. Estos tratamientos térmicos son conocidos como temple, recocido y revenido. Las mejoras, o modificaciones de las propiedades, además de ser medidas en los ensayos propios de las características, quedan reflejadas en la estructura metalográfica, y es aquí donde se encuentra la explicación a este aumento, o disminución, de las propiedades mecánicas.

Todos los tratamientos empleados consisten en un calentamiento a temperatura variable, un tiempo de mantenimiento a dicha temperatura y un adecuado enfriamiento. En el temple la temperatura debe ser suficientemente elevada seguida de un enfriamiento suficientemente rápido. El calentamiento tiene por objeto modificar la estructura, para conseguir modificar el tamaño del grano y con ello la dureza del material. El recocido es un tratamiento térmico que depende de los resultados que deseemos obtener, debemos de utilizar diferentes temperaturas de calentamiento, diferentes tiempos de mantenimiento y diferentes modos de enfriamiento. El revenido se da a los materiales que han sido sometidos a un temple y tiene dos funciones principales: eliminar las tensiones, y aumentar la tenacidad.

El objeto de este estudio es valorar las condiciones más adecuadas de los tratamientos térmicos de entre las consideradas, mediante comparación de resultados de los ensayos realizados, para una muestra de bronce.

Para su valoración, se han realizado tres temples todos ellos a 750°C pero con 2, 1 y ½ hora de mantenimiento; cuatro revenidos después del temple 1 (el de 2 horas), todos ellos 1 hora de mantenimiento pero a 200, 300, 400 y 500 °C de temperatura cada uno; y por último, tres recocidos, uno de ellos, el de estabilización a 200°C, 1 hora de mantenimiento y un enfriamiento al aire; otro un recocido contra acritud, 600°C, 3 horas y al



aire; y por último un recocido de homogeneización 750°C, 1 hora y enfriamiento al horno.

## **1 Introducción al bronce**

El bronce es una aleación de cobre y estaño en la que pueden existir ciertas impurezas de hierro, níquel, antimonio, etc., según el mineral del que procedan los metales, y a la que se puede agregar en pequeña cantidad ciertos elementos como el cinc, plomo, berilio, fósforo etc., con el fin de modificar determinadas características como su dureza, acritud y resistencia a la corrosión.

La denominación bronce ha ocasionado una ambigüedad, pues aunque en un principio se llamó así a la aleación cobre-estaño, paulatinamente, a medida que se encontraron nuevas aleaciones con mejora de propiedades, añadiendo nuevos elementos a los bronce originales, se llegó a denominar al bronce por el elemento añadido, dándose el caso paradójico de denominaciones como "bronce al aluminio" o "bronce al berilio" a aleaciones que deberían denominarse "cuproaluminios" o "cupro-berilios", que no tenían estaño.

Es posible que el origen de tal confusión se remonte a 1938, cuando The Metal Industry (Industria del Metal de Londres) y la ASTM (Sociedad Americana de Ensayo de Materiales) propusieron una clasificación del bronce con la intención de diferenciarlo del latón. Así, adoptaron el término bronce todas las aleaciones de base cobre que tuvieran menos del 98% de este metal y que además, tuvieran elementos aleados distintos del zinc, que sólo podían estar en cantidades tales que no influyeran notablemente en las propiedades de la aleación. Latón sería el término aplicado a todas las aleaciones de cobre y zinc que tuvieran menos del 98% de cobre. Otros elementos podrían estar en cantidades tan pequeñas que su efecto sobre las propiedades de la aleación estuviese subordinado al del zinc. Tanto el latón como el bronce se clasificaron según su composición. La Tabla 1 resume algunos ejemplos.

Aleación	Designación	Composición (%)										
		Cu	Sn	Zn	Pb	Fe	Al	Ni	Be	Co	Si	Mn
Latón amarillo	65-34-1	65		34	1							
Latón amarillo al plomo	63-34-2	63		35	2							
Latón hidráulico	83-4-7-6	83	4	7	6							
Bronce al aluminio	88-9-3	88				3	9					
Bronce al aluminio	84-4-10-2	84				4	10	2				
Bronce al berilio	97,3-2-0,4-0,3	97,3							2	0,4	0,3	
Bronce al manganeso	64-24-5,5-3-3,5	64		24		3	5,5					4

*Tabla 1. Ejemplo de designaciones antiguas de aleaciones de cobre*

## 1.1 Historia

Hasta el 2,000 ó 2,500 A.C., el cobre había sido el metal usado para toda clase de artefactos. Sin embargo el descubrimiento de que el estaño mezclado con cobre producía una aleación más dura y más fácil de trabajar y fundir, facilitó la fabricación de instrumentos y armas mucho más eficientes.

En realidad se ignora el momento y lugar exacto del descubrimiento de la aleación: cobre- estaño, aunque se supone que fue en la región que proveía los metales en el mediano oriente, Siria, Turquía Oriental. En cuanto a la época también se supone que fue entre el 2,000 y el 1,500 A. C.

El uso del bronce, que así se llamó a la aleación del cobre-estaño, demoró en propagarse. En Egipto, por ejemplo se usó muy poco el bronce hasta el 1,500 A. C. alrededor de esa época también aparece el bronce en la China, aún cuando en esa región del mundo no se había utilizado con anterioridad el cobre.

El bronce por su durabilidad, y por la facilidad con que se funde en moldes, ha sido empleado y sigue siendo empleado para la construcción de infinidad de objetos, con preferencia los de índole ornamental, tales como lámparas, molduras, herrajes, etc.



El bronce fue la primera aleación de importancia obtenida por el hombre y da su nombre al período prehistórico conocido como Edad de bronce. Durante milenios fue la aleación básica para la fabricación de armas y utensilios, y orfebres de todas las épocas lo han utilizado en joyería, medallas y escultura. Las monedas acuñadas con aleaciones de bronce tuvieron un protagonismo relevante en el comercio y la economía mundial.

El término *bronce* deriva probablemente del persa "*berenj*", (latón). Otras versiones lo relacionan con el latín "*aes brundisium*" (mineral de Brindisi) por el antiguo puerto de Brundisium. Se cree que la aleación puede haber sido enviada por mar a este puerto, y desde allí distribuida a todo el Imperio romano.

## **1.2 Bronce en la actualidad**

Cabe destacar entre sus aplicaciones actuales su uso en partes mecánicas resistentes al roce donde se requiere elevada resistencia a la corrosión y buena resistencia a la tracción, empleo como cojinetes, forros metálicos y engranajes. Además en instrumentos musicales de buena calidad como campanas, gongs, platillos de acompañamiento, saxofones, y en la fabricación de cuerdas de pianos, arpas y guitarras. También se suele utilizar con fines decorativos y ornamentales, platos, esculturas... En la construcción se emplea en grifos, tubos y uniones porque es adecuado para trabajar con agua fría o caliente aunque algo ácida o salada, y vapor saturado o recalentado. La aplicación depende mucho del tipo de bronce, se explica en el *capítulo 4 Tipos de bronce* la aplicación concreta de cada uno de ellos dependiendo del porcentaje de estaño que contenga la aleación.

## 2 Propiedades del bronce

El término *bronce* se aplicó originalmente a las aleaciones cobre-estaño, y es conocido desde muy antiguo. Sin embargo, actualmente el término *bronce* se emplea para designar cualquier aleación de cobre, excepto las de cobre-cinc (latón), que contengan hasta un 12 por ciento, aproximadamente, del elemento principal de aleación; así, por ejemplo, se habla de bronce de aluminio, de berilio, de cromo o de silicio.

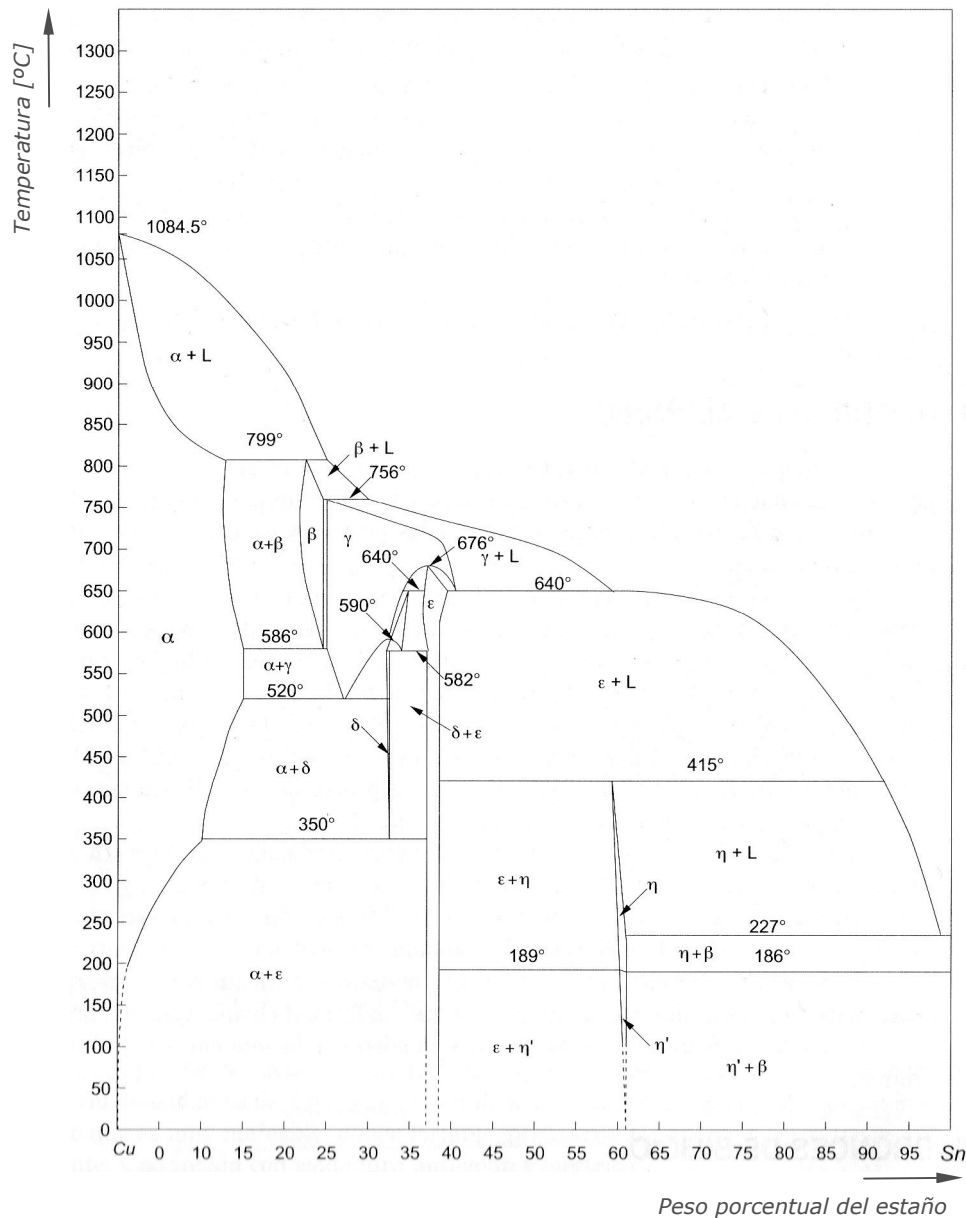
El bronce tradicional es una aleación Cu-Sn, generalmente con contenidos de Sn de hasta un 32 por ciento como máximo. Las soluciones sólidas Cu-Sn son más resistentes y menos dúctiles que las de Cu-Zn.

### 2.1 Fases del bronce

Para comprender mejor el comportamiento de estas aleaciones se incluye en la figura 3.1 el diagrama de equilibrio del sistema Cu-Sn, donde aparecen las siguientes fases:

- *Fase  $\alpha$* , es una solución sólida de sustitución de Sn en cobre, con estructura cúbica centrada en las caras; la solubilidad máxima es de 15,8% a 520°C e inferior a 1% a la temperatura ambiente, si bien en las condiciones de enfriamiento industrial se mantiene en solución un porcentaje muy superior a este último. Muy maleable en caliente y en frío.
- *Fase  $\beta$* , solución sólida de Sn en Cu, con red cúbica centrada, con fórmula  $\text{Cu}_5\text{Sn}$ , no tiene interés industrial porque solo es estable por encima de los 586°C.
- *Fase  $\gamma$* , solución sólida de Sn en cobre, de red cúbica centrada.
- *Fase  $\delta$* , compuesto intermetálico estable hasta 350°C, de fórmula  $\text{Cu}_3\text{Sn}_8$ , muy duro y frágil.

- Fase  $\varepsilon$ , compuesto intermetálico ortorrómbico, de fórmula  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , muy duro y frágil.



*Fig. 2.1. Diagrama de fases de equilibrio del sistema cobre estaño*

Durante el enfriamiento en las condiciones de equilibrio tienen lugar las siguientes transformaciones de fases:

A partir de la solución sólida  $\alpha$  se puede precipitar, según la composición inicial, el compuesto intermetálico  $\varepsilon$  ó  $\delta$ ; este último a 350°C, se transforma en el  $\varepsilon$ . Por tanto, a la temperatura ambiente los

constituyentes de equilibrio de las aleaciones con menos de 22% de Sn, con las fases  $\alpha$  y  $\epsilon$ . Ahora bien; como la velocidad de estas transformaciones es muy lenta, las aleaciones con menos de 10% de Sn, con los enfriamientos que se obtienen en la práctica industrial, se presentan solo en la fase  $\alpha$ ; pero como esta fase es inestable, a partir de ella tiende a formarse la  $\epsilon$ , lo que se consigue con un tratamiento de *bonificación* y tal vez durante el trabajo en frío.

A las temperaturas de 798°C y 755°C, tiene lugar, respectivamente, las transformaciones peritéticas:



La fase  $\beta$  se forma como resultado de una reacción peritética (líquido + Sólido 1  $\rightarrow$  Sólido 2) a 798°C. A la temperatura de 586°C sufre una reacción eutectoide para formar la mezcla eutectoide  $\alpha + \gamma$ ; a 520°C la fase  $\gamma$  se descompone también en la eutectoide  $\alpha + \delta$  y a 350°C la fase  $\delta$  se descompone en las fases  $\alpha$  y  $\epsilon$ . De lo expuesto se deduce que las aleaciones de fase  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$  pueden experimentar transformación total de tipo eutectoide, al igual que los aceros.

En los bronce industriales el porcentaje de Sn varía entre 2 – 22 por ciento, por lo que las fases estables a temperatura ambiente son  $\alpha + \epsilon$ . Sin embargo, la fase  $\epsilon$  no suele aparecer, como ya se ha comentado, pero pueden presentarse fuertes segregaciones con *formación* de fase  $\delta$ , muy duro, que va a mejorar la resistencia al desgaste. La solución sólida  $\alpha$  aporta la resistencia mecánica y la tenacidad.

## 2.2 Propiedades mecánicas

Entre las propiedades mecánicas del bronce podemos destacar:

- Elongación: inferior al 65%
- Módulo de elasticidad: entre 80 y 115 GPa
- Dureza Brinell: entre 70 y 200 kg/mm<sup>2</sup>
- Resistencia a la tracción: entre 300 y 900 MPa
- Resistencia a la cizalla: entre 230 y 490 MPa
- Densidad: entre 7,4 y 8,9 g/cm<sup>3</sup>
- Conductividad térmica: de 20 a 200 W/(K·m)
- Dilatación por metro: 12 a 15 mm (importante para moldes)

En la figura 2.2.1 se representan las variaciones de los bronce en sus propiedades mecánicas, en estado de laminado y recocido, en función del porcentaje de Sn.

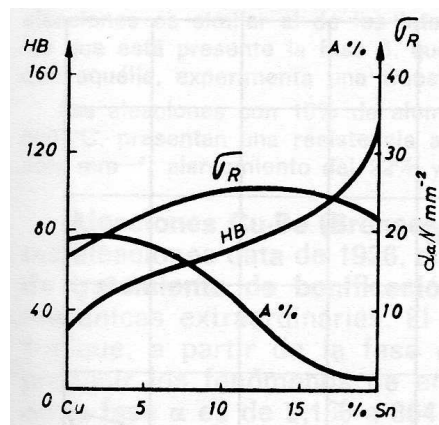


Fig. 2.2. Variación de propiedades mecánicas en función de la composición

La siguiente tabla representa las características mecánicas de algunos bronce:

Estado	Composición				Características			
	% Cu	% Sn	% Pb	% Zn	$\sigma_R$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_E$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)	H (kg/mm <sup>2</sup> )
Laminado, blando	94	6	-	-	38÷45	-	60÷70	75
Laminado, duro	94	6	-	-	60÷85	-	4÷6	170÷210
Fundido	89	11	-	-	26	14	16	88
Fundido	87	13	-	-	25	17	3	95
Fundido	84	16	-	-	25	20	1,4	117
Fundido	86	12	-	2	20	-	5	80
Fundido	93	4	1	2	20	-	15	50
Fundido	85	5	5	5	15	-	10	60
Fundido	85	7,5	2,5	5	20	-	12	60
Fundido	82	8	3	7	15	-	6	70
Fundido	85	9	1	5	20	-	12	65
Fundido	86	10	1,5	2,5	20	-	9	65
Fundido	80	10	10	-	28	14	30	65
Fundido	78	8	14	-	26	13	22	60
Fundido	70	9	21	-	20	12	16	59
Fundido	81	-	18,5	-	7,8	3,2	6,6	29
Fundido	73,5	-	26	-	6,4	5	4,5	22

Módulo de elasticidad = 11.000 a 12.500 kg/mm<sup>2</sup>, según composición.

*Tabla 2.2. Características mecánicas de algunos bronce*

## 2.3 Pátina

La pátina (del lat. «*patīna*», *plato*, por la costra verde encontrada en platos o patenas antiguas romanas de cobre), es la corrosión del cobre como un proceso espontáneo, que tiene lugar debido a la tendencia que tienen todos los metales de regresar a su estado original en la naturaleza, es decir a la forma de minerales, del cual fueron extraídos por el hombre mediante procesos tecnológicos como el calor, para ser luego refinados en metales puros, que también fueron aleados con otros de forma artificial. Es una capa de carbonato de cobre verde que se forma en medallas y estatuas de bronce, o bien, el matiz oscuro que le da el tiempo a los cuadros.

El bronce y el cobre se degradan lentamente, combinándose nuevamente con elementos del medio ambiente para volver a su estado natural. El resultado con el tiempo será una capa de sales de cobre sobre la superficie del metal, pátina. El estaño es relativamente inerte y es estable

en aleación con el cobre, no se separará como puede ocurrir con la plata y el cobre.

## **2.4 Comparación entre bronce y aceros**

Exceptuando al acero, las aleaciones de bronce son superiores a las de hierro en casi todas las aplicaciones. Por su elevado calor específico, el mayor de todos los sólidos, se emplea en aplicaciones de transferencia del calor. Aunque desarrollan pátina no se oxidan bajo la superficie, son más frágiles y tienen menor punto de fusión. Son aproximadamente un 10% más pesadas que el acero, a excepción de las compuestas por aluminio o sílice. También son menos rígidas, por lo tanto en aplicaciones elásticas como resortes acumulan menos energía que las piezas similares de acero. Resisten la corrosión, incluso la de origen marino, el umbral de fatiga metálica es menor, y son mejores conductores del calor y la electricidad.

Otra característica diferencial de las aleaciones de bronce respecto al acero, es la ausencia de chispas cuando se le golpea contra superficies duras. Esta propiedad ha sido aprovechada para fabricar martillos, mazas, llaves ajustables y otras herramientas para uso en atmósferas explosivas o en presencia de gases inflamables.

### 3 TÉCNICA DE FUNDICIÓN

El método más utilizado para la fundición artística del bronce es el de la "cera perdida" o microfusión, que (con diversas variantes) sigue básicamente los pasos siguientes:

1. Modelado original en barro, escayola u otro material.
2. Toma del molde principal, generalmente en escayola. Una vez fraguado, se retira el núcleo (modelo original)
3. El molde "negativo" se llena con cera para producir un "positivo" de este material.
4. Se recubre la cera con una mezcla de arcilla. Una vez seca, se lleva a horno, donde la cera se funde y se "pierde".
5. En el caso de objetos pequeños, el nuevo molde sirve directamente para el colado del bronce. Para piezas mayores, es habitual llenarlo con una capa de cera que formará una película del espesor deseado para el bronce, y el interior (macho) se rellena con material refractario. Todo el proceso requiere la colocación de aireadores, canales de colado y diversos cuidados para obtener una colada homogénea.
6. Acabado que incluye limado de imperfecciones, asperezas y pulido de la pieza.
7. Pátina, mediante la aplicación de distintos ácidos y calentamiento a soplete para agilizar la oxidación.



*Fig. 3.1. Técnica de fundición del bronce*



## **3.1 Obtención del bronce**

### **3.1.1 Cobre**

Se encuentra nativo principalmente en EE. UU., Bolivia, Chile y Japón. Combinado se halla el Azurita ( $\text{CO}_3\text{Cu} \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ), también la Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y la Clacopirita ( $\text{S}_2\text{FeCu}$ ) que es el principal mineral utilizado en la obtención del cobre. En la Rep. Dom. hay yacimiento de Calcopirita y Cuprita en la cordillera central y se cree que el cobre será el próximo mineral Dominicano a explotarse en pequeña y mediana escala.

El método seguido en la industria para extracción del cobre son dos: vía seca y vía húmeda. El más importante es por la vía seca, que se basa en proceso de tostación y fusión del mineral.

En la naturaleza, los minerales de cobre aparecen mezclados con diversos tipos de materiales rocosos desprovistos de valor, que constituyen la denominada ganga, de la que deben ser separados para su explotación. Por ello es necesario realizar un primer proceso de triturado y pulverizado, a partir del cual se concentra por diversos procedimientos, según sea el mineral de cobre que se esté tratando.

En el caso más común, que es el de los sulfuros, suele aplicarse el tratamiento llamado de flotación. Consiste el proceso en verter la molienda sobre agua con resina de creosota y un agente químico orgánico.

### **3.1.2 Estaño**

El estaño se formó en el seno del magma granítico rico en sílice, llamado magma "ácido", que ascendía de las entrañas de la Tierra. Sin embargo, no en todos los magmas ácidos se descubre la presencia de estaño y, hasta la fecha, desconocemos las leyes que establecen el enlace mutuo entre este metal y el granito: no se sabe por qué el estaño abunda en unos yacimientos, mientras que en otros, al parecer de constitución idéntica, casi no existe.

Pocas veces se encuentra en estado nativo. Se obtiene principalmente de la casiterita ( $\text{SnO}_2$ ), que contiene 79% de estaño.

Se obtiene por medio de reducción con carbono. La operación se realiza en hornos. La principal impureza del estaño es el hierro. Para eliminar esta impureza se funde nuevamente a bajas temperatura.

### **3.1.3 Bronce**

Para obtener el bronce, se mezclan los lingotes de estaño con los lingotes de cobre en crisoles o en un horno de reverbero o de cubilote. Se calienta a elevadas temperaturas para fundir los dos materiales. Una vez conseguida la mezcla homogénea, se vierte en el molde (con forma de lingote) y se deja enfriar.



## 4 Tipos de bronce

La acción del Sn en los bronce es similar a la del Zn en los latones, pero proporciona mejor calidad a la aleación, aunque son más difíciles de trabajar y son más caras. De los bronce industriales los más destacados son:

- *Bronces  $\alpha$* , con menos del 6 por ciento de Sn. Están formados solamente por fase  $\alpha$ , con tendencia a formar la fase  $\epsilon$ , que es la responsable del aumento de resistencia cuando se trabaja en frío. Los bronce de este tipo son blandos, dúctiles y maleables, fáciles de conformar en frío, llegando a tener resistencia a la tracción de  $100 \text{ daN/mm}^2$ . Laminados en calientes y recocidos, presentan una resistencia entre 26 y  $35 \text{ daN/mm}^2$ . Por su maleabilidad se les emplea para la fabricación de barras, alambres, chapas, monedas, ornamentos, etc. Suele tener una temperatura de fusión  $1050^\circ\text{C}$ , una conductividad térmica aproximada de  $70 \text{ kcal/(hm}^\circ\text{C)}$  y un peso específico entorno a  $8,8 \text{ kg/m}^3$ . También se denomina *bronce de laminación* (3-10% de Sn) o *bronce rojo* (4-12% de Sn)
- *Bronces con 10 - 12 por ciento de Sn o bronce de cañón*. Están constituidos por fase  $\alpha$  y pequeñas proporciones de  $\delta$ . Por su resistencia y dureza se emplean en la fabricación de engranajes, tornillos sin fin, casquillos y válvulas. Con un 10 por ciento se fabrican piezas decorativas que deben recibir un tratamiento de pulido y abrillantamiento para la fabricación de tubos. Tiene un peso específico aproximado de un  $8,8 \text{ kg/m}^3$ ; una temperatura de fusión entorno a  $1150^\circ\text{C}$ ; una contracción lineal aproximada, con molde de arena, de un 1,4 por ciento; y una conductividad térmica entorno a  $43,5 \text{ kcal/(hm}^\circ\text{C)}$ . En algunos ámbitos se denomina *bronce fosforoso* (10-20% de Sn) porque suele contener un 1 por ciento de fósforo.



- *Bronces con 12 - 18 por ciento*, presentan fase  $\alpha$  y gran proporción de fase  $\delta$ , que proporciona gran dureza y resistencia. Son maleables en caliente y resisten bien el rozamiento. Se emplea para la fabricación de cojinetes, ruedas y piezas de fricción lenta. Con un 16 por ciento se pueden fabricar cojinetes que sean sometidos a cargas, válvulas y segmentos para cilindros. Con un 14 por ciento se usa para piezas que tengan que soportar grandes cargas y maquinaria de obras públicas. Y con un 12 por ciento se obtiene una aleación apta para soportar grandes presiones y todo tipo de líquidos.
- *Bronces con 20 - 22 por ciento*, de Sn o bronce de campanas, contiene fase  $\alpha$  y  $\delta$ , son muy duros y poseen una elevada sonoridad, por lo que se usan para obtener campanas fundidas. También se conoce con el nombre de bronce gris, porque en su estructura de rotura se aprecian reflejos blancos, consecuencia de que el estaño no está bien mezclado con el cobre.

En la fundición, cuanto más estaño tiene la pieza más fácil resulta su colabilidad y más baja su temperatura de fusión.

Al igual que en los latones (Cu-Zn), se suele añadir hasta un 2% de Pb para mejorar su maquinabilidad (propiedad que permite comparar la facilidad con que pueden ser mecanizados). El plomo no se disuelve sino que se queda formando pequeñas partículas dispersas que reducen la fricción en las partes sujetas al desgaste por rozamiento, como en los cojinetes o donde las máquinas herramientas se desgastan, por ejemplo en la superficie de interacción. En ocasiones se añade algo de Zn para abaratar el bronce y mejorar su fluidez.

Otros bronce utilizados comercialmente son los bronce de aluminio y los bronce de silicio, que se llaman bronce pero en realidad son aleaciones de Cu-Al (los bronce de aluminio) y de Cu-Si (los bronce de silicio), es decir se llaman bronce pero no están aleados con estaño. Una generación

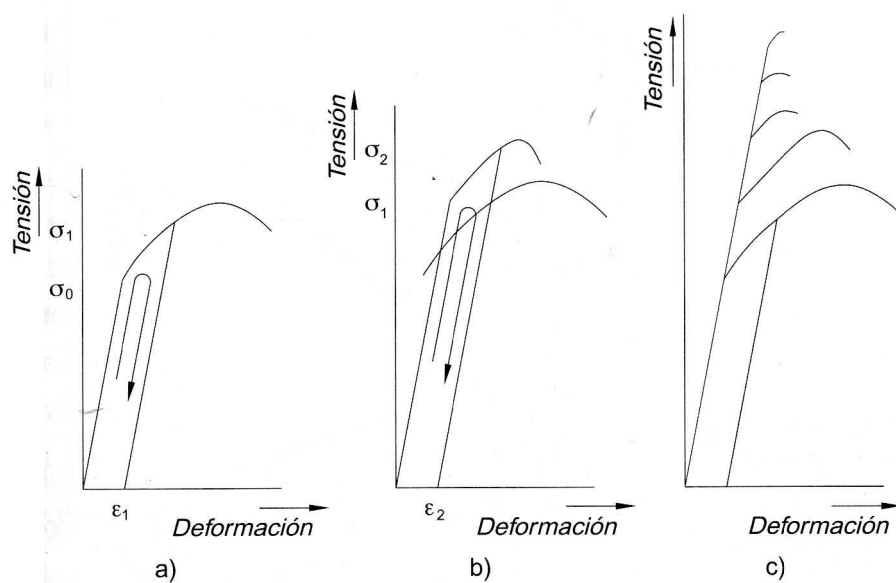


reciente de cobres de alta resistencia son los Cu-Be. Ellos poseen una amplia combinación de propiedades: Resistencia a la tensión, excelentes propiedades eléctricas, y a la corrosión y resistencia al desgaste cuando están apropiadamente lubricados. La desventaja es que son bastante costosos.

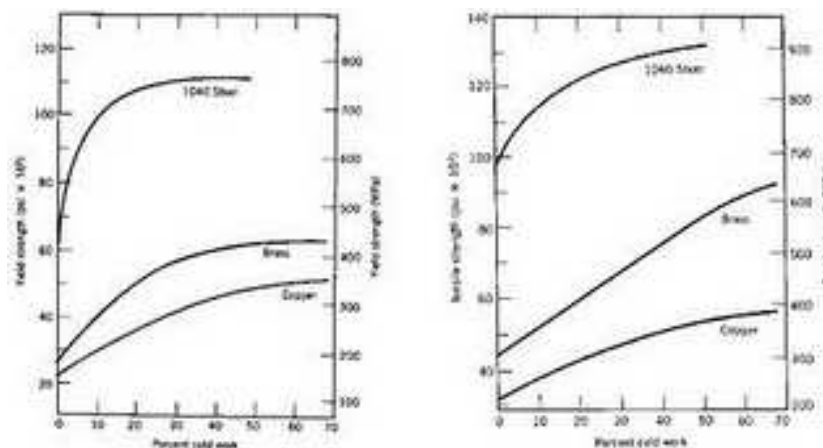
## **5 Deformación plástica y mecanismos de aumento de la resistencia**

El endurecimiento por deformación plástica en frío es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente. Generalmente a este fenómeno también se le llama trabajo en frío, debido a que la deformación se da a una temperatura "fría" relativa a la temperatura de fusión absoluta del metal.

El fenómeno consiste en aplicar un esfuerzo superior al límite elástico, entonces se produce una deformación que permanece aunque se elimine el esfuerzo. Si sobre este material, ya deformado, se vuelve a realizar otro ensayo de tracción la curva que se obtiene sería distinta: tendría un límite elástico más elevado ( $\sigma_1$ ), mayor resistencia a la tracción y menor ductilidad. Si se aplica un esfuerzo  $\sigma_2$  superior al anterior se vuelve a deformar plásticamente el material. Cada vez que se le aplica un esfuerzo superior al material se aumenta el límite elástico y la resistencia a tracción, a la vez que se disminuye la ductilidad. Si se continuara aplicando esfuerzos cada vez mayores se llegaría a un límite elástico y a una resistencia a la tracción iguales, y a una deformación mínima.



*Fig. 5.1. Desarrollo del endurecimiento por deformación a partir del diagrama esfuerzo-deformación: a) a una probeta se le aplica un esfuerzo superior al del límite elástico antes de retirar el esfuerzo; b) ahora la muestra tiene un límite elástico mayor y una resistencia a la tracción mayor, mientras que disminuye la ductilidad; c) repitiendo el procedimiento, se continua incrementando el límite elástico y la resistencia a la tracción decreciendo la ductilidad hasta que la aleación se vuelve muy frágil.*



*Fig. 5.2. Variación de la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tensión para el acero 1040, el bronce y el cobre.*

En los diagramas se muestra la variación de la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tensión para el acero 1040, el bronce y el cobre. Note

que la resistencia del material aumenta al aumentar el porcentaje de trabajo en frío, sin embargo la ductilidad del material disminuye.

El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica así:

1. El metal posee dislocaciones en su estructura cristalina.
2. Cuando se aplica una fuerza sobre el material, las dislocaciones se desplazan causando la deformación plástica.
3. Al moverse las dislocaciones, aumentan en número.
4. Al haber más dislocaciones en la estructura del metal, se estorban entre sí, volviendo más difícil su movimiento.
5. Al ser más difícil que las dislocaciones se muevan, se requiere de una fuerza mayor para mantenerlas en movimiento. Se dice entonces que el material se ha endurecido.

Para que el endurecimiento del metal se mantenga, es necesario que las dislocaciones que fueron creadas durante la deformación se mantengan en la estructura del metal. La estructura cristalina del metal tiene un número *normal* de dislocaciones. La deformación plástica ha causado que haya más dislocaciones que ese número *normal*, por lo que la estructura cristalina tenderá a hacer desaparecer a las dislocaciones *extra*.

Si se aumenta la temperatura del material hasta el grado que se permita la difusión atómica, las dislocaciones *extra* desaparecerán del material, haciendo que éste recupere las propiedades mecánicas que tenía antes de ser deformado, lo que se conoce como *recocido contra acritud* que más adelante se explicará en detalle. Sabemos que la difusión se activa a una temperatura mayor que 0.4 veces la temperatura de fusión del material en grados absolutos.



## 6 Tratamientos térmicos de los bronce

En este apartado se va a tratar con especial interés sobre lo que ocupa este trabajo; tratamientos térmicos aplicables a los bronce.

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de las muestras, y consisten en calentar y mantener los materiales a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas posteriormente en las condiciones establecidas. Variando la forma de calentamiento y enfriamiento de las muestras se pueden obtener diferentes combinaciones de las propiedades mecánicas.

Los factores a tener en cuenta en todo tratamiento térmico son:

- Temperatura de calentamiento
- Tiempo de permanencia a la temperatura de calentamiento
- Velocidad de enfriamiento

Hay que fijarlos siempre de forma previa, teniendo en cuenta: la composición del bronce, la forma y tamaño de la pieza y las características que se desean obtener.

Los tratamientos térmicos más comunes son *recocido*, *normalizado*, *temple* y *revenido*. En estos casos se puede modificar la estructura pero no afecta a la composición química.

### 6.1 Temples

El temple consiste en un calentamiento a una temperatura suficientemente elevada (pero sin llegar a una temperatura demasiado elevada que pudiera producir un engrosamiento de grano, disminuyendo las propiedades mecánicas) seguido de un enfriamiento suficientemente rápido.

Los factores más importantes en el temple son los siguientes:

- Temperatura de calentamiento: el calentamiento tiene por objeto modificar la estructura, esta temperatura no debe de ser muy elevada porque podría provocar un engrosamiento de grano, disminuyendo sus características mecánicas. En este caso hemos decidido la temperatura de 750°C que según la composición de nuestra muestra (18% o 15 % aproximadamente de Sn) corresponde a una fase  $\alpha + \beta$ .

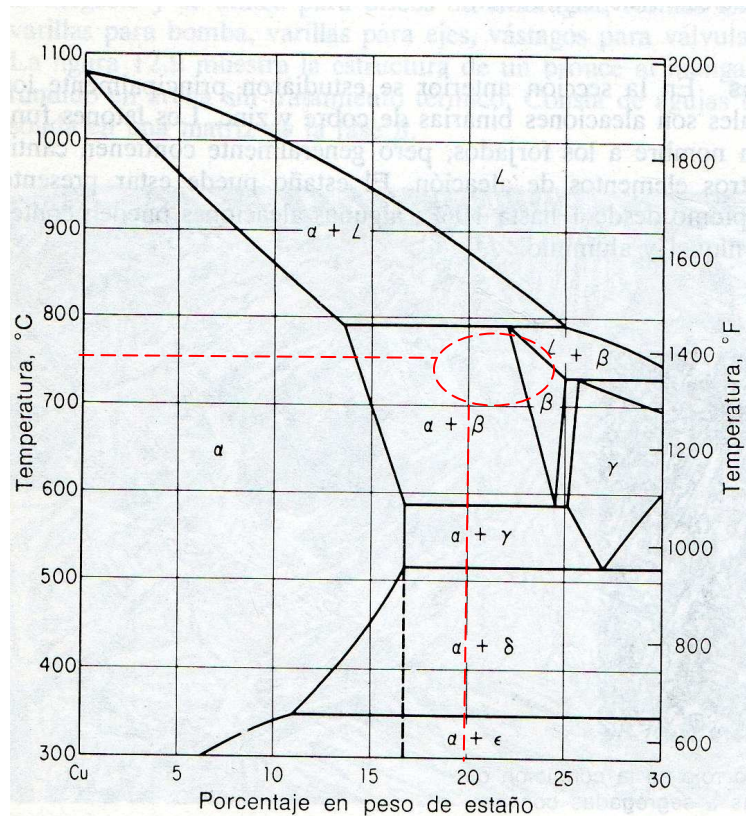


Fig. 6.1. Diagrama parcial de fases

- Velocidad de enfriamiento: en la velocidad de enfriamiento influyen distintos factores:
  - *La temperatura de temple*: Cuanto mayor es ésta, mayor es la velocidad de enfriamiento.
  - *Tamaño del grano*: la velocidad crítica de temple de muestras de grano grueso es menor que la velocidad crítica de temple de las muestras de grano fino.
  - *Tamaño de las piezas*: el volumen y espesor de las piezas tienen gran importancia en el temple de las muestras. La



parte exterior del elemento que está en contacto con el medio de enfriamiento se enfría rápidamente, la capa siguiente no enfría tan rápido y, conforme más se encuentre al interior, más lento se enfría ya que la transmisión del calor se hace cada vez más lentamente. Esto hace que en piezas delgadas la velocidad de enfriamiento sea prácticamente igual en la periferia que en el núcleo, mientras que en piezas gruesas la velocidad disminuye de la periferia al interior debido al efecto de masa.

- *Medio de enfriamiento.* El medio de enfriamiento junto con la composición, el tamaño y la forma de las piezas son los factores que determinan la velocidad de enfriamiento de las piezas en el temple. Para obtener los mejores resultados en el temple, conviene utilizar el medio de enfriamiento menos enérgico que sea capaz de producir una velocidad de enfriamiento superior o igual a la crítica. En los enfriamientos demasiado rápidos existe el peligro de que las tensiones creadas, debido al desigual enfriamiento de las piezas, produzcan grietas y deformaciones. Hay distintos medios de enfriamiento: utilizando agua salada muy agitada se consiguen las mayores velocidades; y enfriando las piezas en el interior del horno se obtienen las menores. Enfriando al aire, en aceite o sales se consiguen velocidades intermedias, pudiendo elegirse entre todos ellos el que mejor cumple las condiciones de enfriamiento deseadas. La eficacia de un medio de enfriamiento se mide por su *severidad de temple* ( $H$ ), que regula la velocidad de enfriamiento en la superficie de la pieza. Se dice que un medio posee una *severidad de temple infinito* ( $H=\infty$ ), cuando la *superficie de la pieza* adquiere *instantáneamente* la temperatura del medio, aunque esto no se da nunca en la práctica. En este trabajo se ha utilizado como medio de enfriamiento

agua, en el capítulo 8 se explica más detallado las condiciones elegidas para cada tratamiento.

## 6.2 Recocido

El recocido es un tratamiento térmico que consiste en un calentamiento a temperatura variable, un tiempo de mantenimiento a dicha temperatura y un adecuado enfriamiento.

El recocido es un tratamiento térmico que tiene por objetivos:

- La eliminación de las tensiones generadas en el anterior proceso
- Ablandar el material
- Aumentar la plasticidad, ductilidad y tenacidad del material
- Regenerar su microestructura.

Los tiempos de calentamiento y enfriamiento de las piezas a tratar dependen de la forma y el tamaño de las piezas. Las velocidades de variación de temperatura altas provocan tensiones internas altas. Estas tensiones internas pueden provocar deformaciones y grietas en el material.

El recocido se suele utilizar también para eliminar defectos que se generan por deformación en frío.

Las etapas de un recocido son:

- Calentamiento del material a una temperatura prefijada: las piezas de poco espesor y de formas sencillas se pueden introducir directamente en los hornos calientes a una temperatura entre 750 y 850°C. Cuando las piezas son gruesas, el calentamiento debe ser progresivo y uniforme para dar tiempo a que el corazón de la pieza también alcance la temperatura de recocido. Esto evitará, como se ha mencionado, la generación de tensiones y grietas no deseadas. Al mismo tiempo se permite a la muestra el paso por las diferentes zonas críticas. La temperatura de recocido es variable dependiendo del



tipo de recocido que se vaya a realizar, y este depende de las características finales que se quieran obtener.

- Mantenimiento del material durante un cierto tiempo a la temperatura anterior: el tiempo de permanencia oscila entre media hora y una hora por pulgada de espesor de pieza (25 mm, aproximadamente). Cuando el calentamiento se ha realizado lentamente, se mantiene media hora por pulgada, y si el calentamiento ha sido rápido se eleva el mantenimiento a una hora por pulgada.
- Enfriamiento lento hasta la temperatura ambiente a una velocidad determinada: el enfriamiento debe de ser lo suficientemente lento para formar las estructuras correspondientes en toda la muestra. Estos enfriamientos se pueden conseguir de varias maneras:
  - Dejando enfriar las piezas en el interior del horno, apagándolo o disminuyendo gradualmente la temperatura.
  - Introduciendo las piezas en baños de sales o metales fundidos.
  - Enfriamiento al aire.

### **6.2.1 Recocido contra acritud**

Se utiliza para bronce que han sido estirados y laminados en frío que han perdido la tenacidad y se han endurecido. Es decir, cuando un material ha sido deformado de forma sucesiva llega un momento en el que se ha deformado tanto que se vuelve excesivamente frágil y duro, y no se puede seguir deformando sin peligro de rotura. Para continuar con la deformación es necesario devolver al material sus características iniciales de ductilidad y maleabilidad. Y este proceso es conocido como recocido contra acritud.

Después del recocido, podría seguir aplicándose trabajo adicional en frío, ya que la ductilidad ha sido restablecida. Combinando ciclos repetidos de trabajo en frío y de recocido, se pueden alcanzar grandes deformaciones totales.

### **6.2.2 Recocido de homogeneización**

Para que una pieza bruta de colada tenga una homogeneidad química, bien sea una pieza moldeada o bien sea un lingote se debe realizar una difusión, que requiere un mantenimiento a una temperatura tan alta como sea posible durante un tiempo determinado. Este recocido tiene como objetivo eliminar posibles heterogeneidades producidas en la solidificación, como son las segregaciones.

### **6.2.3 Recocido de estabilización**

Eliminar tensiones residuales producidas por el mecanizado, deformación o moldeo de las piezas. Es importante eliminar estas tensiones internas ya que pueden ocasionar en un futuro deformaciones. Se realiza a temperaturas de entre 100 y 300 °C y manteniendo este valor durante largos periodos de tiempo. El enfriamiento es al aire.

Con este tratamiento se logra acelerar la estabilización del material, logrando con el aumento de temperatura facilitar la movilidad de los átomos y que se ordenen de la forma más estable.

## **6.3 Revenidos**

Este tratamiento se da a los materiales que han sido sometidos a un temple y tiene dos funciones principales: eliminar las tensiones, y aumentar la tenacidad. Para evitar las tensiones del temple es suficiente una temperatura de revenido de 200°C. En general, lo que queremos conseguir con un revenido es un aumento de la tenacidad y para esto necesitamos temperaturas más elevadas.

El revenido generalmente aumenta el alargamiento, la estricción, y la densidad, y disminuye la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza.

De la misma forma que el resto de los tratamientos térmicos va a pasar por tres fases:

- *Calentamiento:* la temperatura de revenido suele variar entre los 150 y 700°C, esta depende de las propiedades finales deseadas.
- *Mantenimiento:* habitualmente el tiempo de mantenimiento suele ser de una hora. Se han realizado estudios que aseguran que a partir de una hora las propiedades varían tan lentamente que no resulta rentable prolongar el tratamiento.
- *Enfriamiento:* El enfriamiento se realiza al aire.

## **7 Ensayos de propiedades mecánicas y de constitución**

A continuación se va a hablar de una forma genérica y teórica de los dos ensayos que se han llevado a cabo en el laboratorio, ajustándonos al método concreto de cada uno que se ha empleado, para después describir las condiciones de ensayo propias de trabajo. Estos ensayos realizados con distintas probetas son de los siguientes tipos y en el siguiente orden de ejecución en el laboratorio:

1. ENSAYO ESTÁTICO DESTRUCTIVO DE PROPIEDADES MECÁNICAS:  
Ensayo de Dureza
2. ENSAYO DE CARACTERÍSTICAS DE CONSTITUCIÓN: Ensayo Metalográfico

De cada uno de estos ensayos se va a comentar las etapas, si las hubiese, y el procedimiento general para realizarlos, siempre regidos por lo que dice la norma para cada ensayo en cuanto a métodos y limitaciones, adaptándola para el material de ensayo: la muestra de bronce.

### **7.1 Muestras**

Las muestras de este trabajo proceden de un casquillo de bronce de entre un 12-18 % de Sn. El casquillo de bronce en un principio se dividió en 8 muestras para realizar los diferentes tratamientos térmicos (recocidos, revenidos, y temple de 2 horas) y debido a los resultados obtenidos en el temple, se decidió dividir la pieza de suministro, una de las destinadas a los recocidos, y la del temple en dos. Y finalmente tenemos 11 muestras para los diferentes tratamientos.

La sierra que se utiliza para dividir la muestra, dispone de una bomba que suministra taladrina sobre el filo del disco abrasivo para lubricar y refrigerar la zona de trabajo, y conseguir así una mayor duración de la herramienta y una mejor calidad en la superficie cortada. Además la



taladrina ayuda a limpiar los residuos del corte. La siguiente figura muestra la sierra empleada:



*Fig.7.1. Sierra: Metkon; Metacut\_M250 cut-off machine*

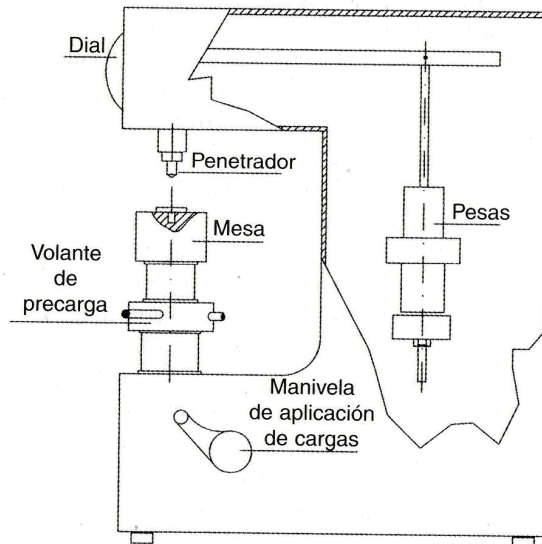
## **7.2 ENSAYO ESTÁTICO DESTRUCTIVO DE PROPIEDADES MECÁNICAS: Ensayo de dureza**

El cálculo de la dureza se utiliza ampliamente para la inspección y control de los materiales. En la industria metalúrgica y, en concreto, en las del acero, el ensayo de dureza es uno de los más utilizados.

Primeramente, hemos de definir dureza como propiedad mecánica para luego hablar del ensayo que la determina. No hay una única forma de definir la dureza, pero de forma general puede decirse que es la resistencia superficial que un material presenta para oponerse a una deformación por rayado o por penetración superficial.

La dureza de un metal depende de la facilidad con que es deformado plásticamente. El elemento que realiza esta deformación es el llamado

*penetrador*, y debe ser por lo tanto de un material más duro que el que se ensaya, como el diamante, carburo de wolframio o acero endurecido. Además va a estar tallado en forma de prisma piramidal, esfera o cono.



*Fig. 7.2.1. Durómetro*

Estas dos variables, material y forma del penetrador, y la carga que se utiliza, determinan el tipo de ensayo de dureza. El penetrador actúa bajo una carga conocida perpendicularmente a la superficie del metal a ensayar, dejando una huella en la misma tras ser retirado el penetrador.

Mediante cálculos con dicha marca (profundidad o área) se llega a un valor experimental de dureza, teniendo en cuenta para ello la presión ejercida.

La dureza se relaciona con la resistencia al desgaste. Un material que se utiliza para fragmentar o para moler mineral debe ser muy duro para asegurar que no se desgastará o sufrirá abrasión debido a los duros materiales que maneja.

De una manera similar, los dientes de los engranes deben ser lo suficientemente duros para que no se desgasten. En general, los polímeros

son excepcionalmente blandos, los metales son de dureza intermedia, y los materiales cerámicos, muy duros.

La dureza va a determinar concretamente la *cohesión* de los átomos como propiedad mecánica del material; para valorarla como dureza, los métodos empleados mediante penetración superficial, básicamente son: Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop.

De éstos, el empleado en este estudio es el método Vickers, que a continuación se describe.

### 7.2.1 Método Vickers

El método Vickers surge como consecuencia de la limitación que tiene el Brinell para materiales duros (si este método, el Brinell, se utilizase para materiales de elevada dureza se deformaría la bola del penetrador y las medidas no serían correctas).

El método Vickers utiliza como penetrador una pirámide cuadrada de diamante, construida de manera que sus caras opuestas forman un ángulo de  $136^\circ$ , figura 7.2.3. Este ángulo se eligió para que la bola del Brinell quedase circunscrita en el borde de la huella. En el ensayo de metalografía se micrografió algunas de estas huellas (figura 7.2.2.).

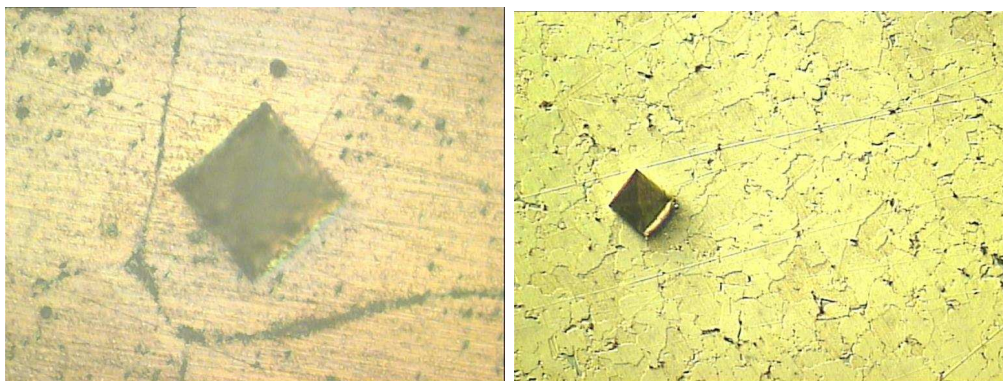


Fig. 7.2.2. Micrografías con huella del penetrador del ensayo Vickers

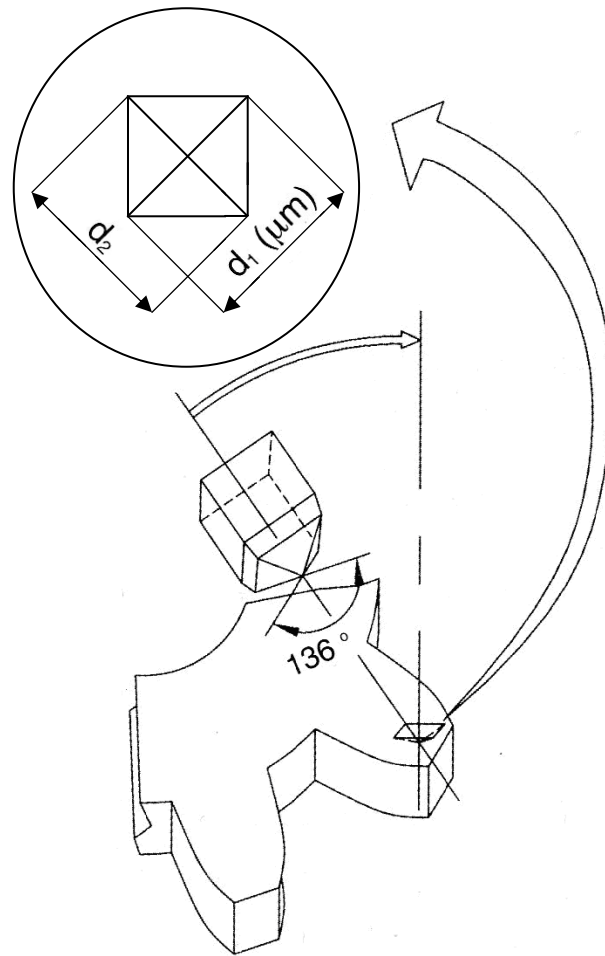


Fig. 7.2.3. Ensayo de microdureza Vickers

El número de dureza Vickers (HV) se define como la relación entre la carga aplicada y la superficie de la huella

$$HV = \frac{P}{S}$$

Donde *HV* = siglas de dureza Vickers (*dureza* = *Hardeness* en inglés);

*P* = carga aplicada al penetrador

*S* = superficie de la huella

Desarrollando la fórmula se obtiene:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{P \text{ (kp)}}{d^2 \text{ (mm}^2\text{)}}$$

Donde  $d$  es la *semisuma* de las diagonales de la huella,  $(d_1+d_2)/2$ .

Al utilizar como penetrador una pirámide, todas las huellas dejadas son geométricamente semejantes, por lo que sólo hay un tamaño de penetrador. Las cargas van a variar en función de la dureza del material, las más corrientes son: 1, 5, 10, 30, 50 y 100 kg.

El procedimiento de ensayo y las características del penetrador y la carga están reguladas por la norma UNE 7-432, *Ensayo Vickers para materiales metálicos*, que van a definir el método de ensayo, así como la forma de dar el resultado. Este se indicará con el valor de dureza obtenido, seguido de las letras HV (dureza Vickers) y el valor de la carga aplicada en el ensayo.

Para materiales *muy delgados*, o en aquellos donde se quieren estudiar variaciones de dureza en zonas muy pequeñas, se puede utilizar este método, pero con cargas *muy pequeñas*, que van desde 1 g hasta 1000 g, es lo que se llama *MICRODUREZA*. Las huellas que dejan son muy pequeñas, del orden de *micras*, por lo que el equipo utilizado debe ser distinto, se llama *microdurómetro* y actúa por un lado como *durómetro* para la aplicación de la carga y realización de la huella y, por otro lado, como *microscopio metalográfico*, para poder ver la huella y calcular la longitud de las diagonales. Al ser una huella del orden de las micras, para poder verla en el microdurómetro la superficie debe ser como un espejo, ya que el microdurómetro trabaja como un microscopio metalográfico y este trabaja por reflexión de la luz sobre una superficie especular.

El método Vickers se puede utilizar para materiales de todo tipo, ya que el penetrador es una pirámide de diamante, es decir, que no se va a deformar ni siquiera con los materiales más duros. Además, al poder aplicar cargas desde 1 g hasta 100 kg se puede elegir el valor más adecuado para cada tipo de material. Por todo esto se ha elegido este método para este proyecto.

### **7.2.1.1 Fases del ensayo**

En primer lugar debemos desbastar y pulir la superficie a ensayar de la misma forma que se explica en el siguiente apartado *Ensayo de características de constitución: ensayo metalográfico* en los apartados 7.3.1.1. *Desbaste* y 7.3.1.2. *Pulido con abrasivos*.

Una vez obtenida una superficie de espejo se procede al ensayo de microdureza, que consta de las siguientes fases:

1. Encender el Durómetro y seleccionar el ensayo de microdureza Vickers *HV* (este microdurómetro es capaz de realizar también el ensayo Brinell, en ese caso se seleccionaría el botón HB)
2. Seleccionar Carga y tiempo: en nuestro caso aplicaremos una carga de 500 g en un tiempo de aplicación de 15 seg.
3. Posicionar la muestra en el soporte con las mordazas.
4. Enfocar el microscopio (x400).
5. Ubicar el punto de identificación mediante los micrómetros.
6. Cambiar el objetivo por el penetrador.
7. Aplicar la carga presionando el botón *STAR*.
8. Esperar hasta que se apague *LOADING* (el tiempo de aplicación).
9. Cambiar el penetrador por el objetivo.
10. Ajustar a cero los displays (cada vez que se enciende el equipo):
  - Enfocar la huella (x400).
  - Aproximar hasta juntar los dos rectas paralelas.
  - Apretar *SET* durante dos segundos hasta que los displays estén a cero.
11. Medir la primera diagonal de la huella:
  - Enfocar la huella (x400).
  - Desplazar las 2 rectas paralelas. Ruleta izquierda.
  - Aproximar o alejar entre sí las 2 rectas paralelas. Ruleta derecha.
  - Pulsar *READ*.

12. Medir la segunda diagonal de la huella:

- Girar el objetivo 90°.
- Seguir los apartados del paso 11.

13. Recoger el dato de la dureza en el display *DATA*.

14. Volver al apartado 5 para una nueva huella.



*Fig. 7.2.4. Durómetro Matsuzawa MXT50.*

## **7.3 ENSAYO DE CARACTERÍSTICAS DE CONSTITUCIÓN: Ensayo Metalográfico**

A modo de introducción a la metalografía, se puede decir que se trata del examen de las superficies de metales y aleaciones. Aquí, se aplicará para la observación de la microestructura de las probetas sometidas al tratamiento térmico, como medio justificativo de los resultados obtenidos en los ensayos de dureza, puesto que este estudio metalográfico proporciona la información necesaria y complementaria para obtener una serie de conclusiones.



La principal aplicación de la metalografía es conocer la naturaleza y distribución de los constituyentes de las aleaciones, es decir, el estudio de los microconstituyentes, su tamaño de grano, forma y distribución. Además, en aplicación a este trabajo, aporta información sobre:

- Presencia de inclusiones
- Defectos, como poros o fisuras en la superficie observada.
- Acritud, según la deformación de los granos producida por trabajo en frío.

### **7.3.1 Técnica operativa**

Se ha partido de las mismas probetas que se sometieron a dureza. Las etapas de este ensayo metalográfico comprende las siguientes que han sido aplicadas, pero no se incluirá la etapa del empastillado puesto que no ha sido necesaria su realización.

#### **7.3.1.1 Desbaste**

La finalidad del desbaste es preparar la superficie para el pulido, y poner al descubierto la superficie, libre de impurezas que puedan obstaculizar su examen, a la vez que darle a la muestra una conformación plana.

Para llevar a cabo esta operación, se ha empleado una máquina de desbaste y pulido con dos platos que giran a velocidad constante, según se muestra en la *figura 7.3.1.1.*, sobre los que se colocan los papeles de lija. Estos se recortan conforme a la geometría del plato y se sujetan a los dos platos por medio de aros exteriores. Los tres tipos de papel de lija empleados son:

- 1-. Lija P 600, de tamaño de grano abrasivo muy grueso.
- 2-. Lija P 800, de tamaño de grano abrasivo intermedio.
- 3-. Lija P 1200, de tamaño de grano abrasivo fino.

La muestra se mantiene ligeramente presionada contra el plato mientras gira durante unos 3 minutos, a la vez, se refrigera la operación



con un goteo constante de agua mediante el dispositivo que tiene el aparato para ello. La primera lija, al ser más basta, elimina las imperfecciones más relevantes, la segunda, con grano abrasivo intermedio, consigue un acabado con rayas y la tercera, más fina, consigue un acabado con pequeñas rayas más finas. De aquí el orden de lijado con los tres papeles.



*Fig.7.3.1.1. Equipo de desbaste y pulido PRESI, modelo MECAPOL P 255 S*

### **7.3.1.2 Pulido con abrasivos**

En esta etapa se pretende conseguir una superficie reflectora tal que, al ser atacada convenientemente y reflejar los rayos luminosos, éstos den en el ocular microscópico una imagen fiel. Para ello, se deben eliminar las rayas que permanecen al final del desbaste.

El equipo utilizado es el mismo que en el desbaste, pero cambiando los papeles de lija por los paños de pulido, además se añade a los paños una solución de abrasivo fino para refrigerar y evitar así una transformación de la superficie a observar, y para obtener la superficie especular. El procedimiento sigue siendo también el mismo que en el desbaste: colocar la probeta sobre el paño mientras gira el disco ejerciendo una ligera presión.

Los paños y abrasivos que se emplearon para pulir las muestras de bronce son un paño sintético rojo con abrasivo de alúmina en agua. Tras pulir todas las muestras durante unos tres minutos cada una se consiguieron unas superficies aceptables para una posterior observación al microscopio.

### **7.3.1.3 Ataque químico**

El objeto del ataque químico es poner de manifiesto la microestructura de la aleación. Con el ataque químico se conseguirán distinguir los granos de las diferentes fases, según el estado de tratamiento térmico de la muestra que se este observando, así como los precipitados formados como resultado del tratamiento aplicado. Puesto que el reactivo químico es selectivo va a atacar y por lo tanto hacer visible sólo algunos de estos microconstituyentes, pues éstos son los que van a reaccionar por su estado de inestabilidad.

Antes de iniciar la aplicación del reactivo, se procedió a limpiar las probetas lavándolas con agua y despejar así las superficies de partículas que pudieran impedir la reacción total del componente químico.

El reactivo específico para las piezas de bronce está indicado en la norma: *ASTM E 407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* consta de:

- Dicromato Potásico ( $K_2CrO_7$ ) = 1gr
- Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) = 4 ml
- Agua destilada ( $H_2O$ ) = 50 ml
- Ácido Clorhídrico (HCl) = 1gota

El reactivo se realiza en un recipiente de cristal echando las proporciones anteriormente indicadas. En primer lugar el agua destilada se echa en una probeta 50ml y después al recipiente. A continuación el dicromato potásico se echa sobre un vidrio de reloj (*fig. 7.3.2.*) y se pesa en una báscula 1 gr, y se echa al recipiente. Y por último con una pipeta echamos 4ml de ácido sulfúrico en el recipiente (con el ácido sulfúrico hay que llevar cuidado y echar siempre ácido sobre agua, nunca agua sobre

ácido). Una vez hecha esta mezcla agitamos el recipiente para que se junten todos los componentes.

Para realizar el ataque antes de todo la pieza debe estar bien pulida en caso de no ser así se debe pulir hasta obtener pulido de espejo. Una vez pulida se pone un poco de reactivo en un vidrio reloj y se añade 1 gota de ácido clorhídrico. Mojamos la muestra por la zona que se desea observar durante 5 segundos, se lava con agua y se seca.



*Fig. 7.3.1.2. Vidrio reloj*

#### **7.3.1.4 Observación al microscopio metalográfico**

El microscopio metalográfico es la herramienta indispensable para la observación de las muestras en el ensayo de metalografía. El microscopio utilizado en este trabajo lleva incorporado un soporte informático conectado al mismo que permite la observación de las imágenes en la pantalla de un ordenador, y nos permite fotografiar las imágenes observadas en el microscopio. Las imágenes quedan reflejadas en el apartado de *Análisis de los resultados y conclusiones*.

En la fotografía de la *figura 7.3.1.4*. se muestra el microscopio utilizado, es marca ZEISS Axiovert 200.



*Fig. 7.3.1.4. Equipo de microscopio metalográfico y soporte informático*

El funcionamiento del microscopio óptico se basa en la emisión de un haz de luz que es reflejada o dispersada sobre la superficie de la muestra, dependiendo de la forma en que fueron debastadas y pulidas las diferentes zonas de la superficie. Las zonas microestructurales que fueron más atacadas, como las fronteras de grano, provocan mayor dispersión de luz. Las que no lo fueron tanto reflejan la luz hacia el sistema de lentes u objetivo y atraviesa el ocular.

Este recorrido amplificado por el sistema de lentes determina el número de aumentos con que se ve la muestra. En la observación realizada en este estudio se utilizaron 50, 100, 200, 500 y 1000 aumentos, que son los máximos permitidos por el microscopio.

En algunos casos se utiliza para la observación *luz polarizada*, para lo cual es preciso colocar un polarizador entre el foco luminoso y la superficie a examinar y un analizador entre el ocular y el objetivo. Con este tipo de iluminación se pueden estudiar, por ejemplo, la *naturaleza de las inclusiones metálicas*, y es muy usada para la investigación de *minerales, rocas y plásticos*.

El hecho de que sea la luz la fuente de radiación para el sistema óptico de este microscopio limita la resolución de numerosos defectos. Algunas de estas limitaciones pueden superarse por el uso de un analizador de



imágenes, por la técnica "Normanski" o mediante un ataque preferencial. La lente Normanski es una cuña que deja pasar diferentes longitudes de onda por ello se pueden observar diferentes colores y tonalidades en las superficies de la muestra.

## 8 Parámetros de los tratamientos térmicos utilizados

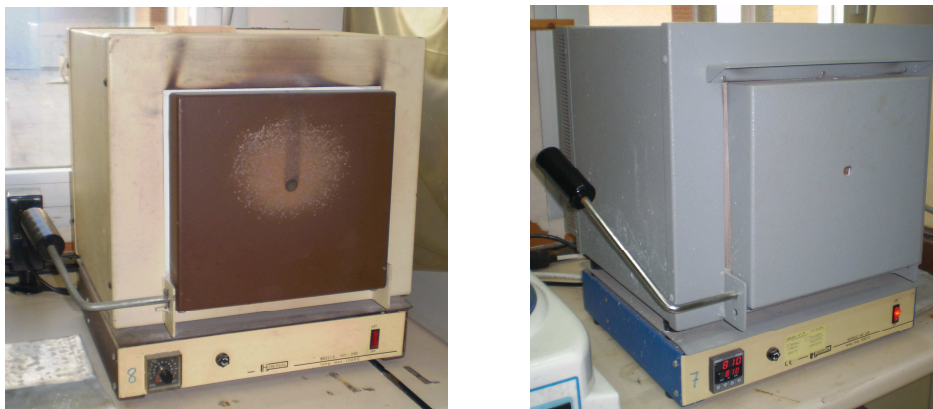
Cada tratamiento realizado en este trabajo ha sido descrito en el capítulo 6, explicando las propiedades y los factores más importantes de cada uno de ellos. En este apartado se explicará las características de cada uno de los tratamientos llevados a cabo en este proyecto.

Los tratamientos realizados en este trabajo han sido los siguientes:

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Enfriamiento
Recocido de estabilización	200	1	Aire
Recocido contra acritud	600	3	Aire
Recocido de homogenización	750	1	Horno
Temple 1	750	2	Agua
Revenido 1 (temple 1)	200	1	Aire
Revenido 2 (temple 1)	300	1	Aire
Revenido 3 (temple 1)	400	1	Aire
Revenido 4 (temple 1)	500	1	Aire
Temple 2	750	1	Agua
Temple 3	750	0,50	Agua

*Tabla 8.1. Tratamientos térmicos realizados*

Para realizar el calentamiento se utilizan los siguientes hornos:



*Fig. 8.1.1 Hornos: Modelo Hobersal. Modelo: HD-230*

## 8.1 Temple

Se han realizado tres temple, todos ellos a 750°C pero con diferentes tiempos de mantenimiento.

En un principio solo iba a realizarse uno de ellos con un tiempo de mantenimiento de 2 horas, pero a la vista de los resultados (grietas intergranulares debidas a la excesiva acumulación de precipitados en los bordes de grano), se decidió realizar dos más para ver como afectaba en la microestructura y en la dureza el tiempo de mantenimiento.

Por lo tanto se han realizado tres temple a 750°C, uno con un tiempo de mantenimiento de 2 horas, el cual hemos denominado *temple 1*, otro con un tiempo de mantenimiento de 1 hora, denominado *temple 2*, y finalmente, otro de media hora de mantenimiento, *temple 3*. La siguiente figura explica gráficamente cada uno de ellos.

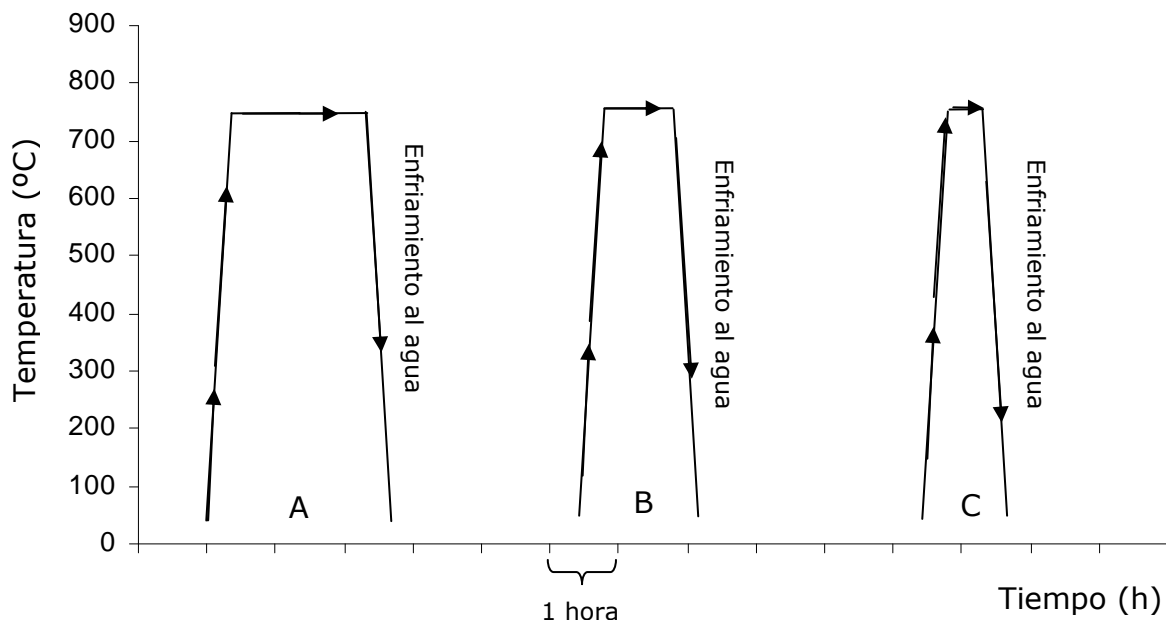


Fig. 8.1. Temple aplicados a las muestras de bronce:

- A. Temple 1 (2 horas en el horno)
- B. Temple 2 (1 hora en el horno)
- C. Temple 3 (1/2 hora en el horno)

El temple 1 se ha realizado en cinco muestras, porque a cuatro de ellas se les realizará después del temple un revenido.

En este caso se ha realizado el temple a la temperatura de 750°C que según la composición de nuestra muestra (18% o 15 % aproximadamente de Sn) corresponde a una fase  $\alpha+\beta$ .

El medio de enfriamiento empleado ha sido el agua. Debe evitarse que el agua se caliente durante el temple. La temperatura del agua debe ser unos 15-20°C, si la temperatura es superior a 30°C se prolonga demasiado el enfriamiento. Se logra aumentar la severidad del temple mediante agitación o mediante la adicción de sales. En nuestro caso hemos aumentado la severidad mediante agitación. Es un medio barato y muy accesible, y además ofrece los resultados esperados.

## 8.2 Recocidos

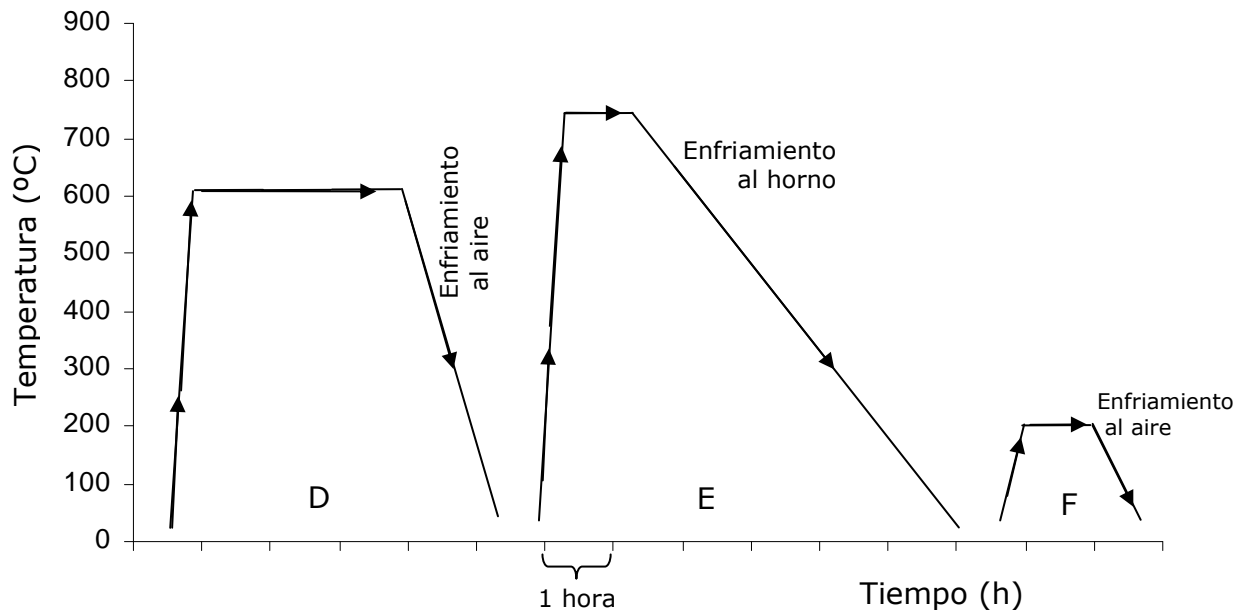
En nuestro caso no se conoce la procedencia de nuestra pieza por lo tanto se deben de realizar varios recocidos para mejorar las propiedades internas de la pieza y para eliminar las tensiones que puedan tener.

Se han realizado tres recocidos, cada uno de ellos para obtener diferentes resultados. Las condiciones de cada recocido son las siguientes:

- Recocido contra acritud
  - Temperatura: 600°C
  - Mantenimiento: 3 horas
  - Enfriamiento: Aire
  
- Recocido de homogeneización
  - Temperatura: 750°C
  - Mantenimiento: 1 hora
  - Enfriamiento: Horno



- Recocido de estabilización
  - Temperatura: 200°C
  - Mantenimiento: 1 hora
  - Enfriamiento: Aire



*Fig. 8.2. Recocidos aplicados a la muestra de bronce:*

*D. Recocido contra acritud*

*E. Recocido de homogeneización*

*F. Recocido de estabilización*

El medio de enfriamiento de los recocidos a menudo suele ser el aire, sin embargo en el recocido de homogeneización se enfría en el horno porque además de conseguir velocidades de enfriamiento lentas evitamos la oxidación de la muestra.

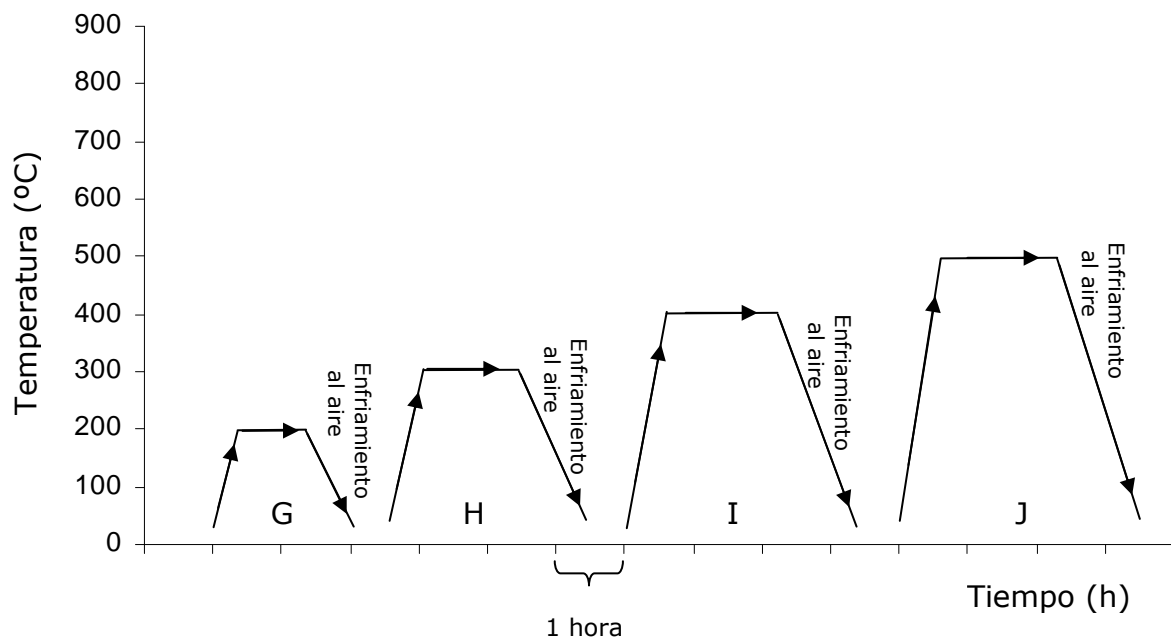
Cada una de las muestras sometidas a los tratamientos de recocido tendrá diferentes propiedades que quedan reflejadas en el apartado 9 Resultados.

## 8.3 Revenidos

El revenido ha sido realizado en cuatro muestras templadas. Las condiciones del temple del que proceden son las correspondientes al *temple 1* (750°C, 1 hora, agua).

Se han realizado cuatro revenidos, todos ellos con las mismas condiciones de enfriamiento y mantenimiento pero diferente temperatura de calentamiento:

- Revenido 1:
  - Temperatura: 200°C
  - Mantenimiento: 1 hora
  - Enfriamiento: Aire
  
- Revenido 2:
  - Temperatura: 300°C
  - Mantenimiento: 1 hora
  - Enfriamiento: Aire
  
- Revenido 3:
  - Temperatura: 400°C
  - Mantenimiento: 1 hora
  - Enfriamiento: Aire
  
- Revenido 4:
  - Temperatura: 500°C
  - Mantenimiento: 1 hora
  - Enfriamiento: Aire



*Fig. 8.3. Revenidos aplicados a la muestra de bronce:*

*G. Revenido 1 (200°C)*

*H. Revenido 2 (300°C)*

*I. Revenido 3 (400°C)*

*J. Revenido 4 (500°C)*

Cada una de las muestras sometidas a revenido tendrá diferentes propiedades que quedan reflejadas en el apartado 9 Resultados.

## 9 Análisis de los resultados de los ensayos

En este capítulo se van a hacer constar los resultados, ya sean numéricos, como en el ensayo de Microdureza Vickers, o de tipo fotográfico, y a nivel microscópico, como ocurre en el ensayo Metalográfico.

### 9.1 Resultados del ensayo de Microdureza Vickers

Para obtener unos resultados concretos en los que basarnos para sacar conclusiones, se ha procedido a realizar seis medidas de dureza HV en cada probeta, y de esta manera hacer una media de dichos valores para obtener datos significativos que pertenecen a una muestra de un determinado tratamiento térmico, tal y como se muestra en las siguientes tablas de resultados.

En algún caso se ha eliminado algún valor que se aleja demasiado del resto de datos, porque puede ser fruto de un error en la medida, por ejemplo, en el momento de la medida la mesa fue golpeada, o el observador moviera el penetrador en el momento de la aplicación de la carga... En el caso de haber eliminado algún valor para realizar la media se indicará con un asterisco (\*) a la derecha del número.

No olvidemos que  $d_1$  y  $d_2$  son las diagonales de la huella. Y que nuestro ensayo ha sido realizado con unas condiciones de carga 500 gramos y con un tiempo de mantenimiento 15 seg.

#### 9.1.1 Muestra de suministro

Ensayo	$d_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_2$ ( $\mu\text{m}$ )	HV ( $\text{kg/mm}^2$ )
1	87,8	86,9	121,5
2	79,6	79,8	145,9
3	85,3	86,7	125,3
4	87,1	84,7	125,6
5	86,3	87,1	123,3
6	89,5	88,0	117,7
DUREZA			122,7

*Tabla 9.1.1. Tabla de dureza de la muestra de suministro*

### 9.1.2 Temple 1

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	103,0	100,2	89,8
2	97,2	95,6	99,7
3	96,9	93,5	102,3
4	95,0	96,3	101,3
5	95,4	98,6	98,5
6	98,7	97,5	96,3
<b>DUREZA</b>			<b>99,6</b>

*Tabla 9.1.2. Tabla de dureza de la muestra de temple 1*

### 9.1.3 Temple 2

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	95,6	88,3	109,6
2	98,1	94,5	99,9
3	94,1	93,5	105,3
4	93,6	93,2	106,2
5	94,2	91,3	107,7
6	94,9	96,9	100,8
<b>DUREZA</b>			<b>104,9</b>

*Tabla 9.1.3. Tabla de dureza de la muestra de temple 2*

### 9.1.4 Temple 3

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	93,2	95,1	104,6
2	98,9	100,1	93,6
3	93,5	92,6	107,0
4	94,3	91,7	107,2
5	93,4	90,6	109,5
6	92,7	92,5	108,1
<b>DUREZA</b>			<b>107,3</b>

*Tabla 9.1.4. Tabla de dureza de la muestra de temple 3*

### 9.1.5 Revenido 1

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	94,7	92,6	105,7
2	92,3	93,0	108,0
3	92,6	91,6	109,3
4	89,5	92,9	111,4
5	96,6	92,7	103,4
6	92,7	94,1	106,2
<b>DUREZA</b>			<b>107,3</b>

*Tabla 9.1.5. Tabla de dureza de la muestra de revenido 1*

### 9.1.6 Revenido 2

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	87,2	89,5	118,7
2	95,0	91,9	106,1
3	92,7	94,0	106,4
4	89,3	92,6	112,0
5	90,8	89,6	113,9
6	92,6	90,3	110,8
<b>DUREZA</b>			<b>111,3</b>

*Tabla 9.1.6. Tabla de dureza de la muestra de revenido 2*

### 9.1.7 Revenido 3

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	85,7	85,3	126,8
2	85,9	86,8	124,3
3	86,3	85,0	126,3
4	83,7	93,2	118,5
5	84,6	87,5	125,2
6	84,7	86,1	127,1
<b>DUREZA</b>			<b>124,7</b>

*Tabla 9.1.7. Tabla de dureza de la muestra de revenido 3*

### 9.1.8 Revenido 4

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	89,3	87,4	118,7
2	88,7	90,2	115,8
3	84,7	86,0	127,2
4	86,3	86,1	124,7
5	87,5	85,2	124,3
6	84,4	86,9	126,3
<b>DUREZA</b>			<b>122,8</b>

*Tabla 9.1.8. Tabla de dureza de la muestra de revenido 4*

### 9.1.9 Recocido de estabilización

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	86,9	84,8	125,8
2	86,5	85,1	125,9
3	89,7	87,9	117,5
4	87,1	85,2	124,9
5	86,6	85,1	125,8
6	86,8	85,3	125,2
<b>DUREZA</b>			<b>124,2</b>

*Tabla 9.1.9. Tabla de dureza de la muestra de recocido de estabilización*

### 9.1.10 Recocido contra acritud

Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	91,2	91,6	110,9
2	89,0	91,8	113,4
3	90,2	92,7	110,8
4	88,2	90,1	116,6
5	89,4	92,1	112,5
6	86,7	91,1	117,3
<b>DUREZA</b>			<b>113,6</b>

*Tabla 9.1.10. Tabla de dureza de la muestra de recocido contra acritud*

### 9.1.11 Recocido de homogeneización

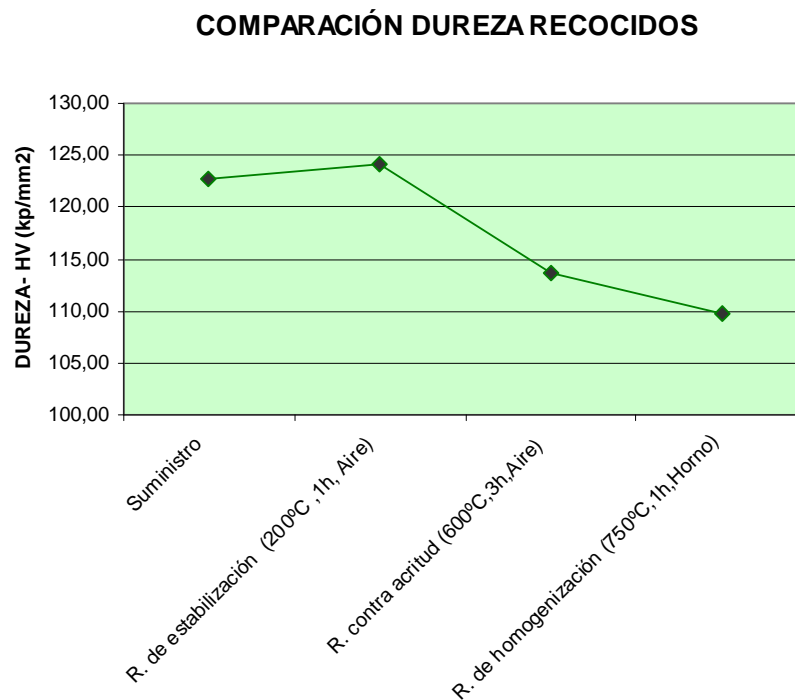
Ensayo	d <sub>1</sub> (μm)	d <sub>2</sub> (μm)	HV (kg/mm <sup>2</sup> )
1	90,1	90,5	113,7
2	94,7	93,5	104,7
3	93,8	90,2	109,5
4	93,1	88,5	112,4
5	94,7	89,4	109,4
6	94,2	90,6	108,5
<b>DUREZA</b>			<b>109,7</b>

*Tabla 9.1.11. Tabla de dureza de la muestra de recocido de homogeneización*

### 9.1.12 Comparación de los diferentes resultados

Tratamiento	HV (kp/mm <sup>2</sup> )
Suministro	122,68
Recocido de estabilización	124,18
Recocido contra acritud	113,58
Recocido de homogenización	109,70
Temple 1	99,62
Revenido 1 (temple 1)	107,33
Revenido 2 (temple 1)	111,32
Revenido 3 (temple 1)	124,70
Revenido 4 (temple 1)	122,83
Temple 2	104,92
Temple 3	107,28

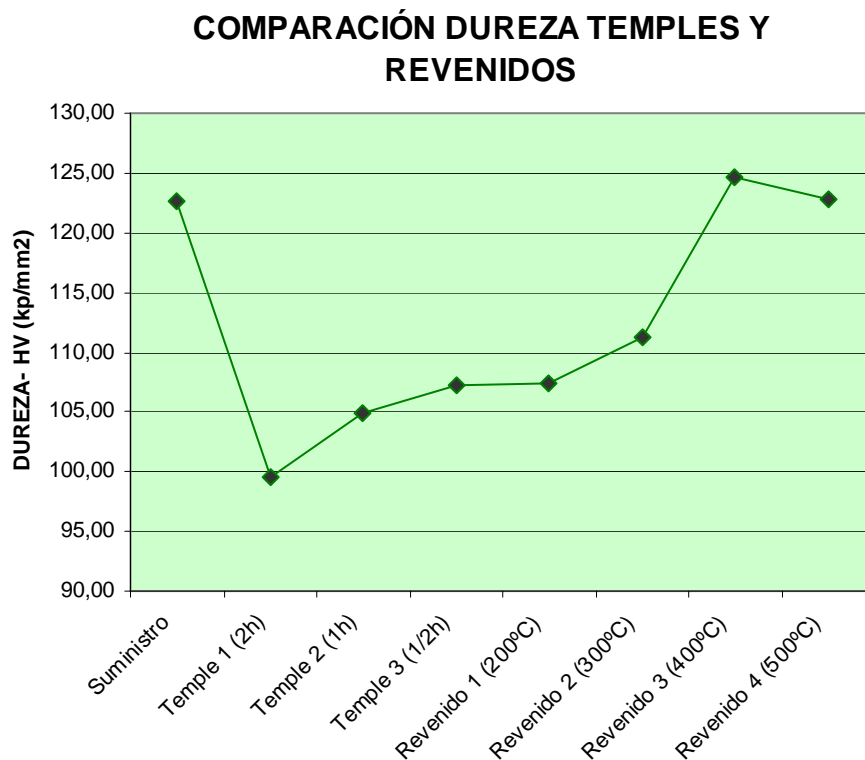
*Tabla 9.1.12. Tabla resumen de dureza*



*Fig. 9.1.12. Comparación dureza recocidos*

Esta gráfica compara la dureza obtenida en el ensayo Vickers de las muestras que han sido sometidas a un recocido comparándolas a su vez con la dureza de la muestra de suministro. Se puede observar que la máxima dureza se obtiene en el recocido de estabilización aunque se puede considerar que la dureza es similar a la de la muestra de suministro porque son unas unidades de dureza Vickers que no son relevantes. En el recocido de homogeneización la dureza ha disminuido considerablemente debido a un engrosamiento del grano que podemos observar, más adelante, en el ensayo metalográfico.





*Fig. 9.1.12. Comparación dureza temple y revenidos*

La anterior gráfica muestra la comparación del valor de la dureza obtenida en las muestras que han sido templadas y revenidas comparándolas también con la dureza de la muestra de suministro. La gráfica indica que conforme se aumenta el tiempo de mantenimiento del temple, disminuye la dureza. Esto se explica gracias al ensayo metalográfico que muestra un aumento del tamaño del grano.

Se observa que la dureza en los revenidos aumenta conforme se aumenta la temperatura. Con el ensayo metalográfico se puede explicar este aumento porque aparecen más precipitados en el interior de los granos lo que aumenta la dureza, si esta temperatura es excesiva las fases se acumulan en los bordes de grano lo que indica que aumenta la fragilidad de nuestro material, que es lo que sucede en el revenido a 500°C.

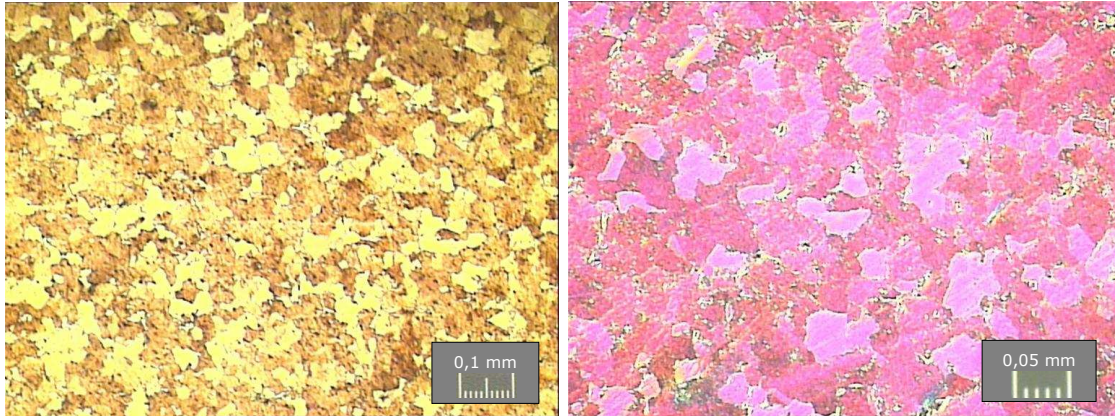
## **9.2 Micrografías obtenidas del ensayo metalográfico**

En este apartado se muestran las micrografías realizadas en el microscopio óptico. Dichas micrografías muestran la microestructura de las diferentes muestras de bronce, tras haberse sometido cada una de ellas al ensayo metalográfico y al tratamiento térmico correspondiente. Excepto para la muestra de suministro, a la que sólo se le ha sometido al ensayo metalográfico para poder observar su microestructura. Además se incluyen unas breves conclusiones de cada una de las micrografías comparándolas con la dureza obtenida en el ensayo Vickres. Los resultados del ensayo de microdureza y los resultados del ensayo metalográfico están íntimamente relacionados entre sí; por ejemplo, para un cierto aumento o disminución de dureza tras un temple, corresponde una cierta variación de la estructura microscópica a modo de granos finos si las características han mejorado, o gruesos si las características han disminuido.

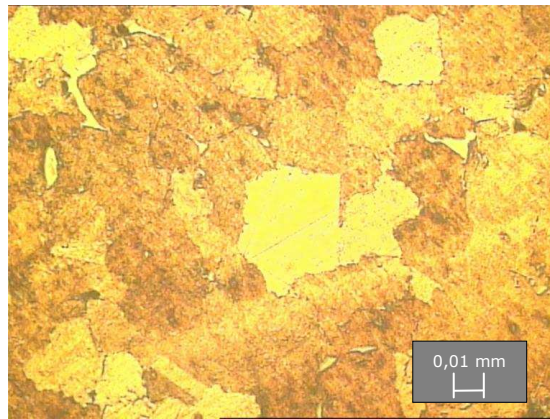
Lo que se va a revelar en estas micrografías es la presencia de los granos, su tamaño y forma. Además se podrá apreciar la existencia de más o menos *rayas*, debido a un acabado de pulido imperfecto, como se ha comentado en el apartado de este ensayo, pero que sí permiten una observación de dichos granos.

Las micrografías de cada muestra están realizadas a 100, 200, 500 y 1000 aumentos cada una, y se han intentado fotografiar las zonas superficiales que mejor mostraban la estructura microscópica. De todas las micrografías realizadas se han seleccionado las más representativas.

### 9.2.1 Muestra de suministro

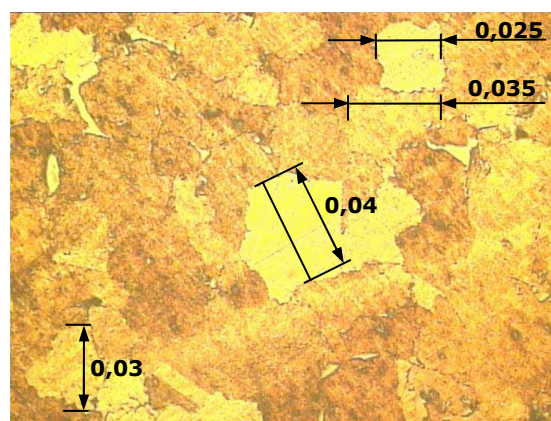


*Fig. 9.2.1.1. Muestra de suministro: izquierda (x100) y derecha (x200)*



*Fig. 9.2.1.2 Muestra de suministro (x500)*

El tamaño de grano de referencia se toma en la muestra de suministro, se han realizado 4 medidas (en milímetros) en la micrografía anterior obteniéndose los siguientes resultados aproximados:



*Fig. 9.2.1.3 Medida del tamaño de grano*

El tamaño de grano medio se obtiene realizando la media de las 4 medidas, obteniéndose un valor de un tamaño de grano medio 0,0325 mm, es decir 32,5  $\mu\text{m}$ .

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 122,68 HV
- Características microestructurales: distribución equiaxial predomina la fase  $\alpha$ , tamaño de grano 32,5  $\mu\text{m}$ , tamaño medio.

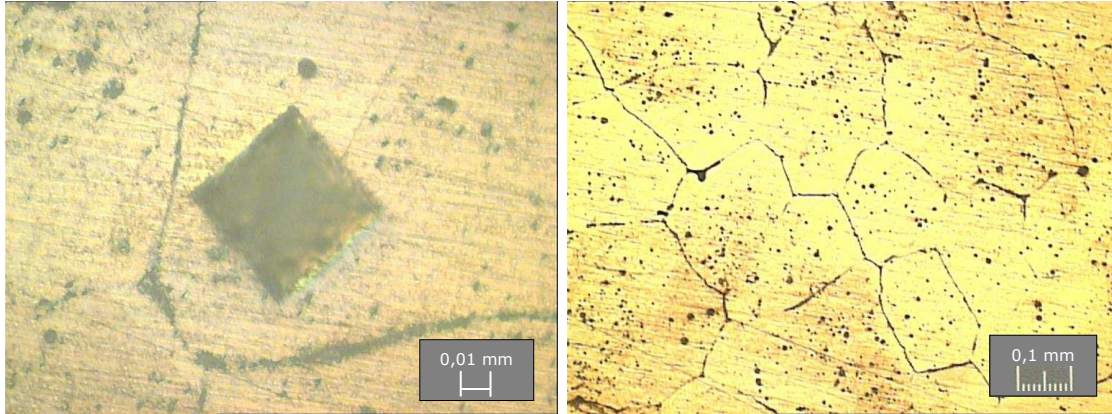
Por lo tanto partimos de una muestra de bronce con una microestructura con granos de forma poligonal que cubre la totalidad de la superficie. Estos granos son pequeños, comparando con el resto de micrográficas, lo que indica que obtendremos una dureza superior al resto de muestras. La dureza obtenida en el ensayo Vickers confirma la anterior afirmación, hemos obtenido la mayor dureza en esta muestra, pero todas las durezas obtenidas en el ensayo son muy parecidas y las variaciones son poco relevantes.

Es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los materiales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento.

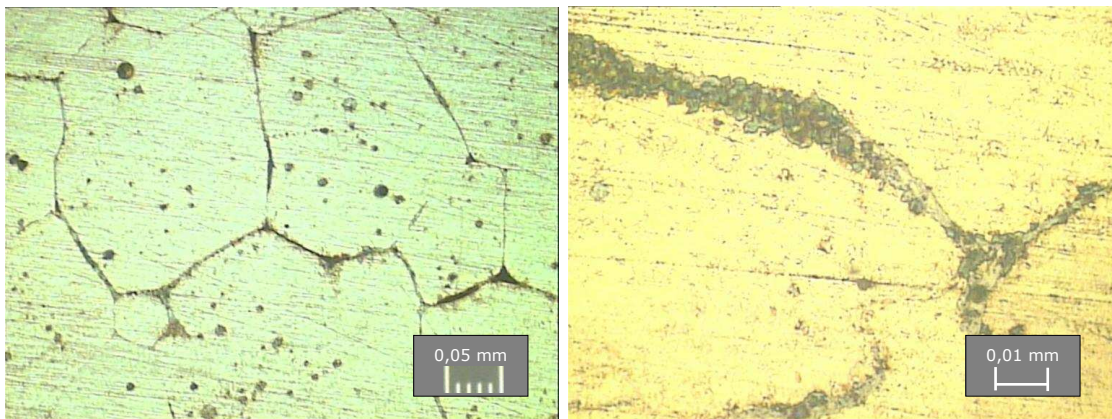
Es un grano equiaxial pues no existe ningún eje cristalino privilegiado en el crecimiento del monocristal.



### 9.2.2 Temple 1



*Fig. 9.2.2.1. Muestra templada 1: izquierda (x500) y derecha (x100)*



*Fig. 9.2.2.2. Muestra templada 1: izquierda (x200) y derecha (x1000)*

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

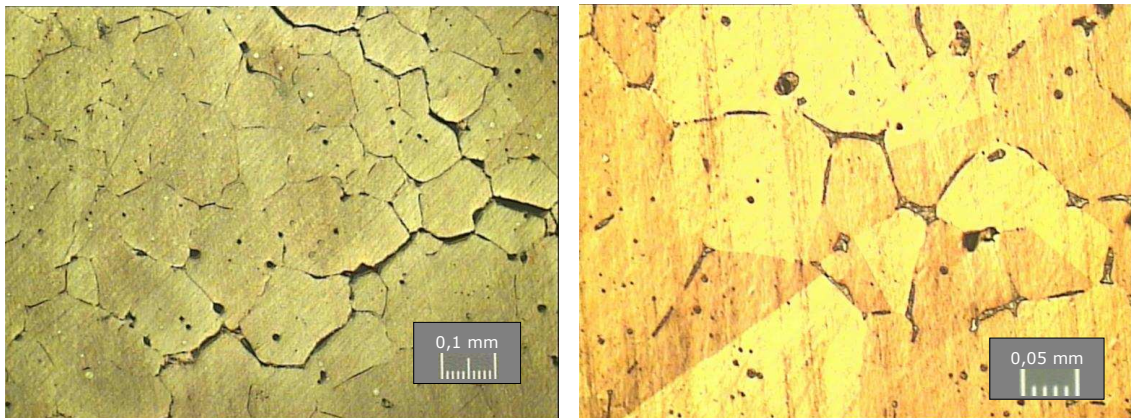
- Valor de dureza media: 99,62 HV
- Características microestructurales: grano grueso y equiaxial con acumulación de fases en el borde de grano.

Tras el temple se obtiene una muestra menos dura que es debido a un engrosamiento del grano y a las acumulaciones en el borde de grano que facilitan el avance de las dislocaciones por el mismo. Se pueden observar en las micrografías precipitados en el interior de los granos que supondría un aumento de la dureza, pero las acumulaciones en los bordes de grano y el grano grueso son más dominantes a la hora de evaluar y explicar el descenso de la dureza.

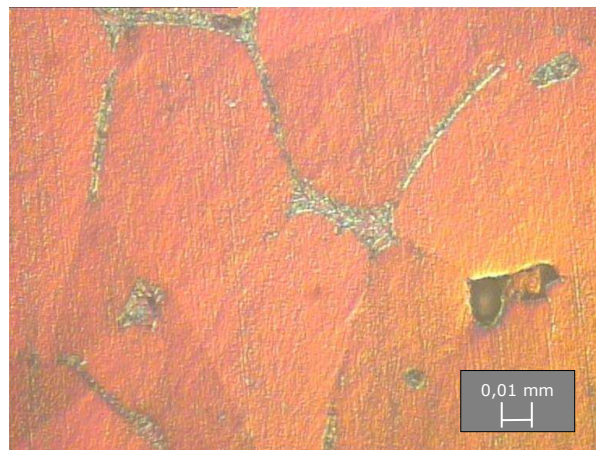
Este grano grueso se debe a que la temperatura escogida para este tratamiento es una temperatura demasiado elevada, y a que el tiempo de permanencia es excesivo, 2 horas.

En una de las micrografías se puede apreciar una huella del ensayo Vickers contenida dentro de un grano.

### 9.2.3 Temple 2

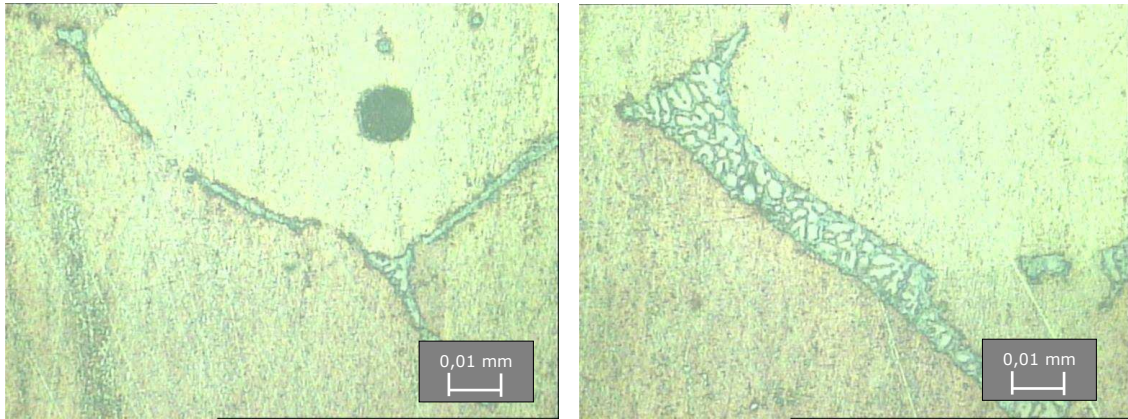


*Fig. 9.2.3.1. Muestra templada 2: izquierda (x100) y derecha (x200)*



*Fig. 9.2.3.2. Muestra templada 2(x500)*





*Fig. 9.2.3.3. Muestra templada 2: izquierda (x1000) y derecha (x1000)*

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

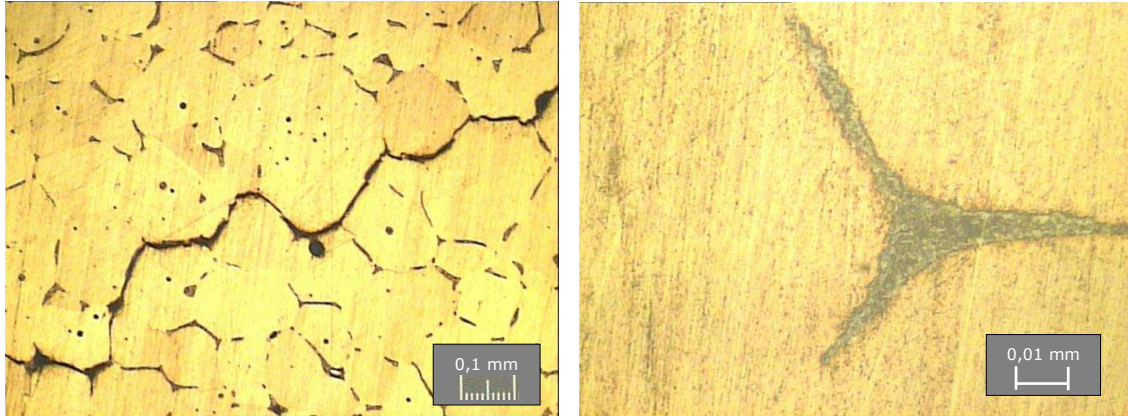
- Valor de dureza media: 104,92 HV
- Características microestructurales: grano grueso, fases en los granos, acumulación de precipitados en los bordes de grano y grietas.

En este temple, realizado a 750°C con un tiempo de permanencia de una hora, se ha obtenido un grano grueso pero no lo es tanto como en el caso anterior, por ello la dureza es ligeramente superior. Es decir, la dureza obtenida en el ensayo Vickers es un poco superior a la obtenida en el temple 1, y esto es debido a que el grano del temple 2 tiene menor tamaño que el grano del temple 1. El grano no ha aumentado tanto de tamaño porque el tiempo de permanencia es menor.

En la primera micrografía se observa una grieta intergranular debida a las acumulaciones en los bordes de grano que afectan negativamente en la dureza del material. Estas acumulaciones facilitan el avance de la grieta por los bordes de grano.

En una de las micrografías (fig. 9.2.3.3. izquierda) se puede observar una fase que ha precipitado de forma esférica. Sabemos que se trata de una fase porque es un precipitado homogéneo.

### 9.2.4 Temple 3



*Fig. 9.2.4. Muestra templada 3: izquierda (x100) y derecha (x1000)*

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 107,28 HV
- Características microestructurales: grano grueso, grieta intergranular y acumulaciones en los bordes de grano.

Este temple, de la misma manera que los anteriores, se ha realizado a la temperatura de 750°C pero este temple con un tiempo de mantenimiento de media hora. Se trata de un grano grueso de tipo equiaxial (no tiene una dirección predominante). La dureza, como en el caso anterior, es ligeramente superior a los otros temples, lo que nos puede indicar que conforme se aumenta el tiempo de mantenimiento del temple se aumenta el tamaño del grano y con ello se disminuye la dureza.

Las acumulaciones en los bordes de grano dan como resultado lo que muestra la *fig. 9.2.4. izquierda*, una grieta intergranular.



### 9.2.5 Revenido 1

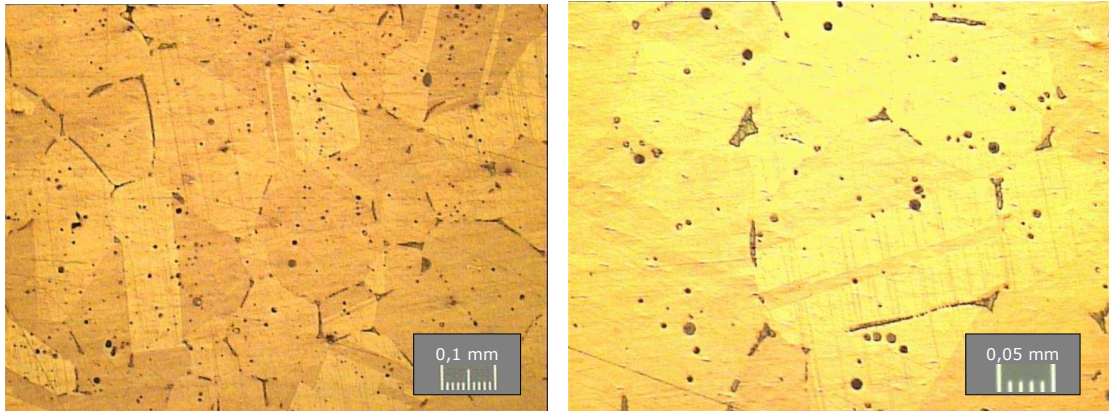


Fig. 9.2.5.1. Revenido 1: izquierda (x100) y derecha (x200)

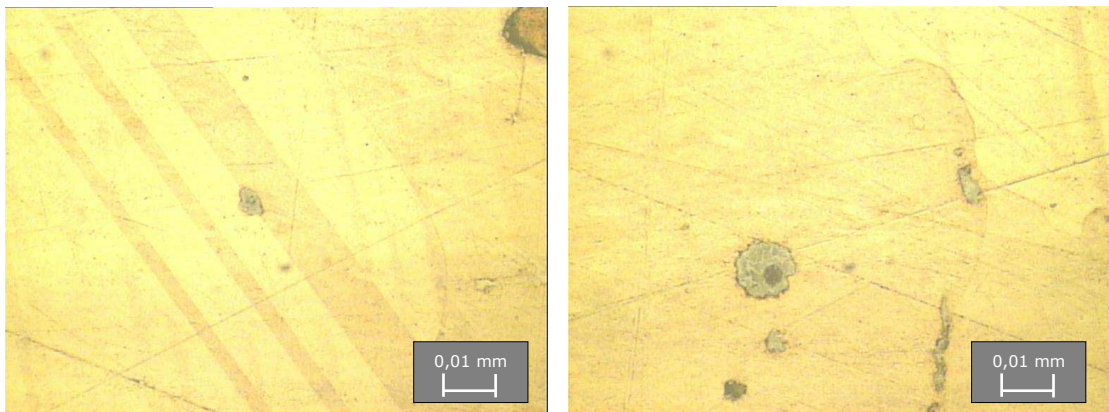


Fig. 9.2.5.2. Revenido 1: izquierda (x1000) y derecha (x1000)

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 107,33 HV
- Características microestructurales: grano de tamaño intermedio más bien grueso, aparición de maclas y de precipitados esféricos en los granos.

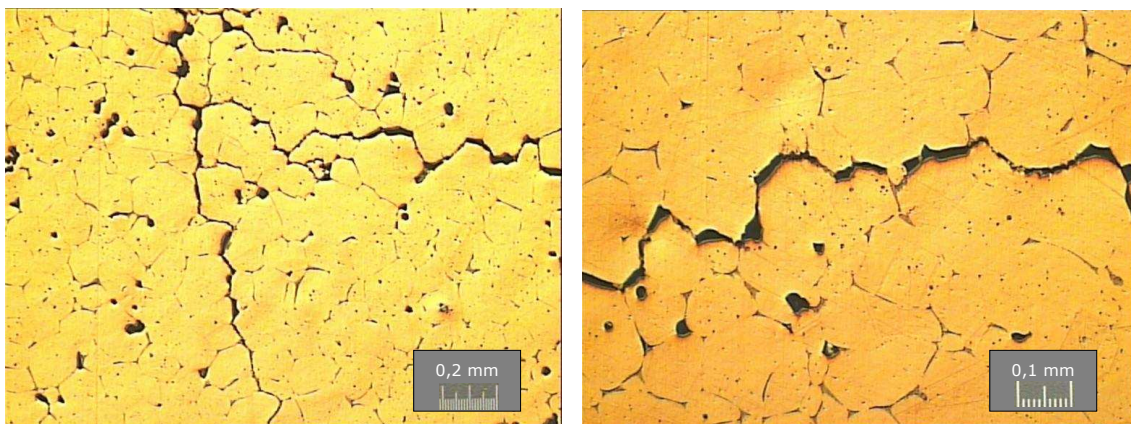
Este revenido se realiza en una pieza que anteriormente ha sido templada con las características del temple denominado *temple 1*.

El valor de la dureza que nos ofrece el ensayo Vickers es un valor superior al que obteníamos en el temple del que procede. Puede deberse a los precipitados nodulares formados y al tamaño ligeramente inferior del

grano. También se observa que no hay una excesiva acumulación de fases en el borde de grano y esto no facilita el avance de grietas por los mismos.

Las maclas se identifican microestructuralmente como subgranos estrechos con bordes bastante rectilíneos y paralelos que dividen el monocristal inicial como aparece en la *fig. 9.2.5.2. izquierda*. Las maclas tienen la misma composición y estructura del grano en que se haya inmersa y son deformaciones plásticas sufridas en el propio grano. La velocidad de formación de una macla es muy alta, repentina. Estas deformaciones endurecen el material porque dividen en partes la dimensión de los granos, bloquea las dislocaciones que en ese momento estuvieran actuando en el monocristal con la consiguiente inhibición del deslizamiento y dificulta el movimiento de bordes de grano por la propia resistencia a compresión que impone la macla cuando el grano tiende a su estirado.

## 9.2.6 Revenido 2



*Fig. 9.2.6.1. Revenido 2: izquierda (x50) y derecha (x100)*

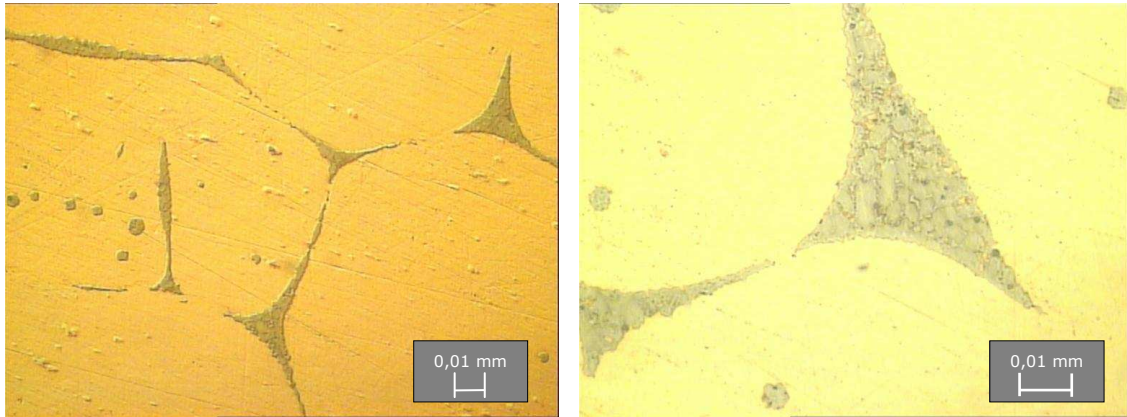


Fig. 9.2.6.2. Revenido 2: izquierda (x500) y derecha (x1000)

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 111,32 HV
- Características microestructurales: tamaño de grano intermedio, grieta intergranular, acumulación de precipitados en los bordes de grano, precipitados y fases nodulares en el interior de los granos.

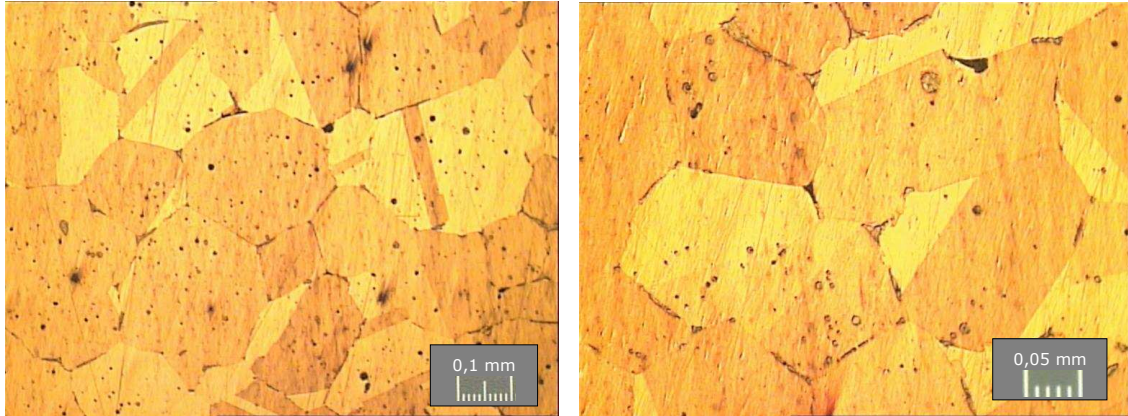
El revenido 2 es un tratamiento que también tiene un previo *temple 1* que se realiza a temperatura superior al anterior revenido, concretamente se realiza a 300°C.

El ensayo Vickers nos da un valor no muy superior al anterior revenido que puede deberse a un tamaño de grano muy parecido, aunque en ambos casos se trata de un grano grueso.

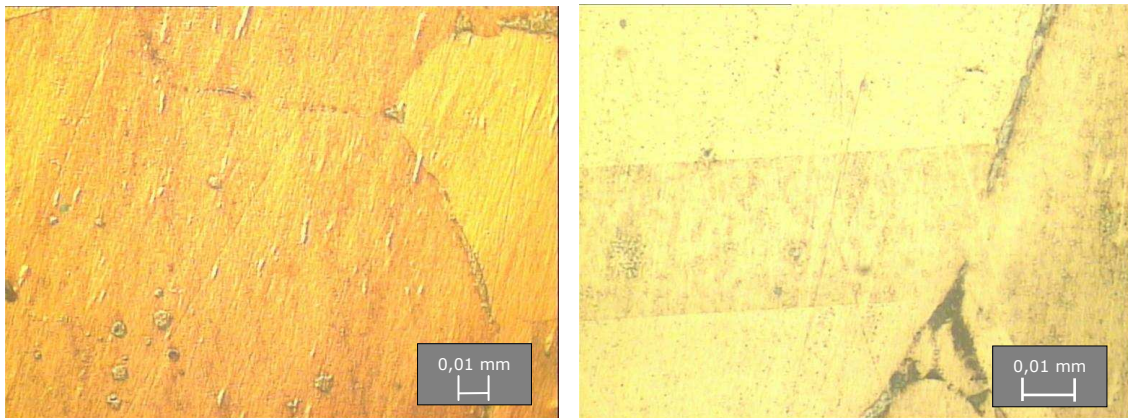
Las micrografías nos muestran una grieta intergranular debida a los precipitados en los bordes de grano que muestran la figura 9.2.6.2. *derecha*. Estos precipitados en los bordes de grano hacen que la pieza sea frágil porque los pequeños granos que forman estos precipitados lo son. También se observan precipitados y fases nodulares en los granos que colaboran en el aumento de la dureza.



### 9.2.7 Revenido 3



*Fig. 9.2.7.1. Revenido 3: izquierda (x100) y derecha (x200)*



*Fig. 9.2.7.2. Revenido 3: izquierda (x500) y derecha (x1000)*

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 124,70 HV
- Características microestructurales: precipitados en el interior de los granos, grano grueso, maclas.

Este revenido como en los casos anteriores proviene de un *temple 1*, pero en este caso el revenido se ha realizado a una temperatura de 400°C.

En esta muestra nos encontramos con la dureza más alta de todas las obtenidas en este trabajo por el ensayo Vickers. Este resultado se explica porque los precipitados en el interior de los granos aumentan la dureza del material, y al no encontrar acumulación de estos precipitados en los bordes de grano se disminuye también la fragilidad de este. Además estas fases son pequeñas y están repartidas lo que fomenta aún más el aumento de la

dureza. No nos olvidemos que estamos hablando de aumentos de la dureza insignificantes, 10 o 20 unidades aproximadamente de dureza Vickers.

También el aumento de la dureza se ve favorecida por la aparición de maclas.

### 9.2.8 Revenido 4

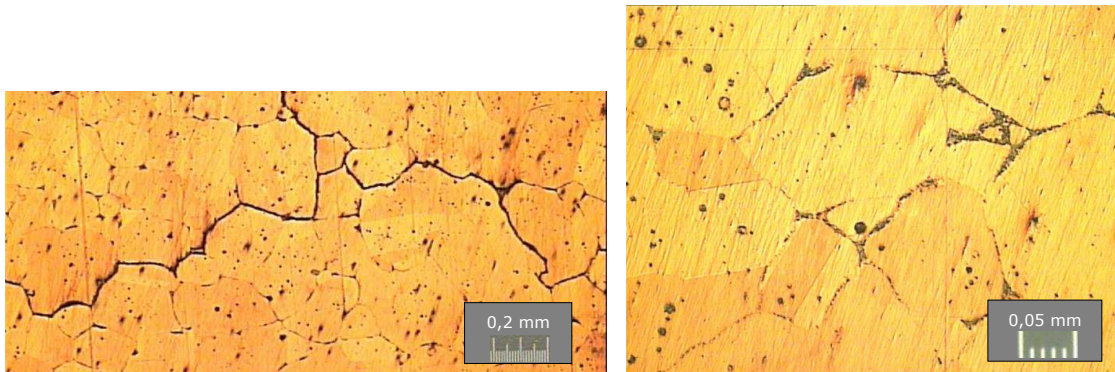


Fig. 9.2.8.1. Revenido 4: izquierda (x50) y derecha (x200)

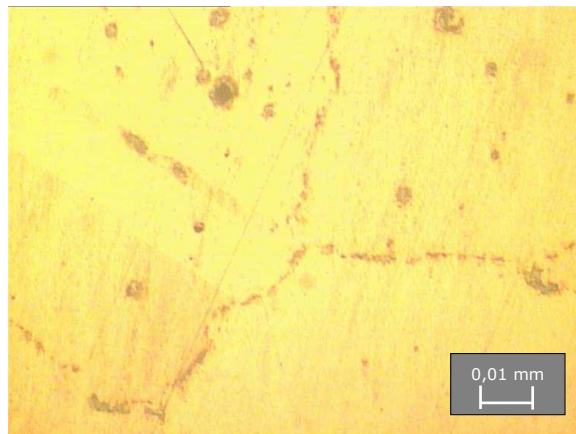


Fig. 9.2.8.2. Revenido 4 (x1000)

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 122,83 HV
- Características microestructurales: acumulación de precipitados en el borde de grano, grieta intergranular, aparición de precipitados en el interior.

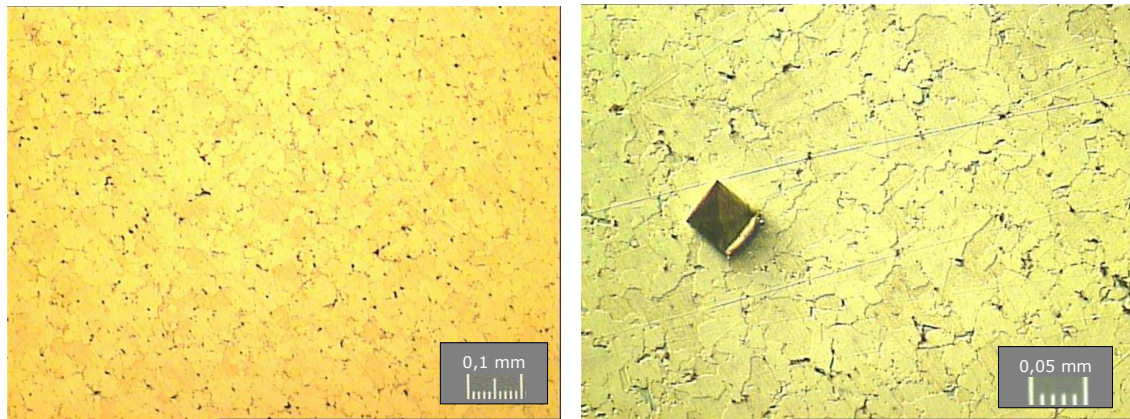
De la misma manera que el resto de revenidos este se realiza en una pieza templada con las condiciones del *temple 1*. En esta muestra se obtiene también una de las durezas más elevadas del proyecto porque tiene



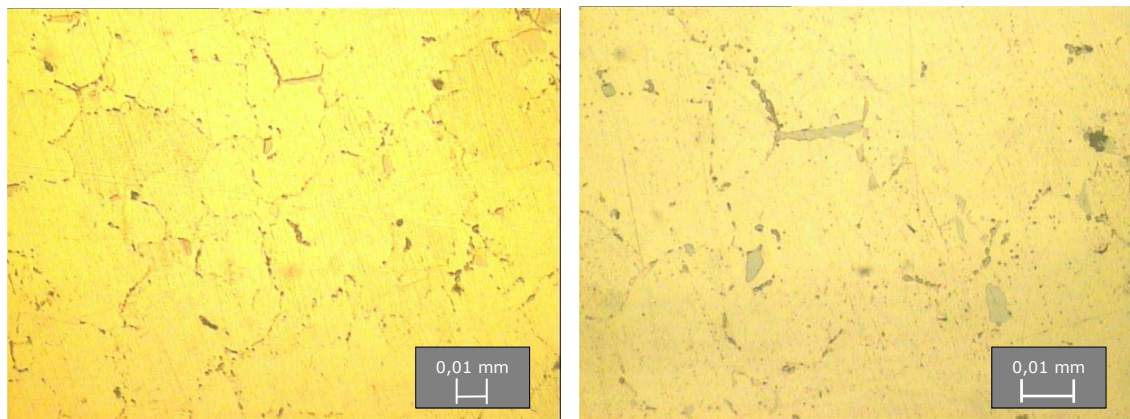
precipitados repartidos en el interior de los granos y como hemos comentado anteriormente esto favorece al aumento de la dureza.

En la primera micrografía se muestra una grieta intergranular debido a la acumulación de fases frágiles en el borde de grano.

### 9.2.9 Recocido de estabilización



*Fig. 9.2.9.1. Recocido de estabilización: izquierda (x100) y derecha (x200)*



*Fig. 9.2.9.2. Recocido de estabilización: izquierda (x500) y derecha (x1000)*

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 124,18 HV
- Características microestructurales: grano pequeño, fase dispersa.

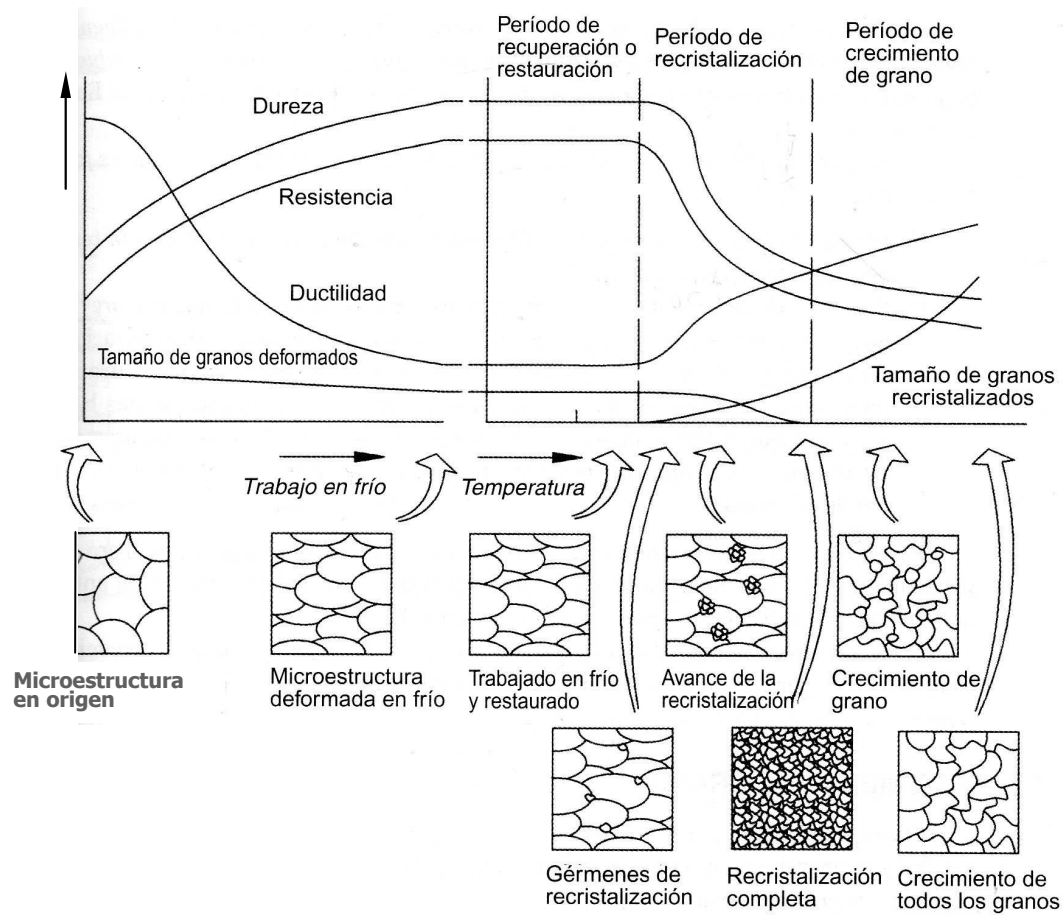


El recocido de estabilización es un tratamiento realizado a la pieza de suministro en el que buscamos eliminar tensiones de un posible mecanizado anterior.

El valor obtenido en el ensayo de microdureza es uno de los valores más altos conseguidos en este trabajo esto se debe a que es el grano más fino que hemos observado. Además nos encontramos con un grano con fase precipitada en su interior y no en los bordes de grano lo que fomentaría grietas intergranulares.

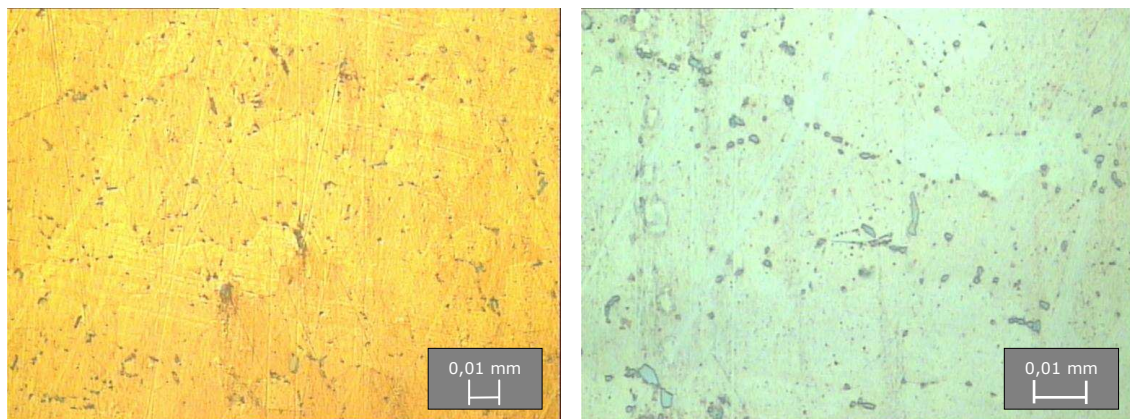
En la micrografía de la *fig. 9.2.9.1 derecha* se observa una huella del ensayo Vickers.

El recocido de estabilización apenas modifica las propiedades. En la siguiente figura se muestra la representación esquemática del ciclo de recocido trabajado en frío. Con la muestra que se le ha aplicado el recocido de estabilización estamos en el periodo de restauración en el que la dureza, la resistencia, la ductilidad, es decir, las propiedades mecánicas no se modifican con el tratamiento térmico.



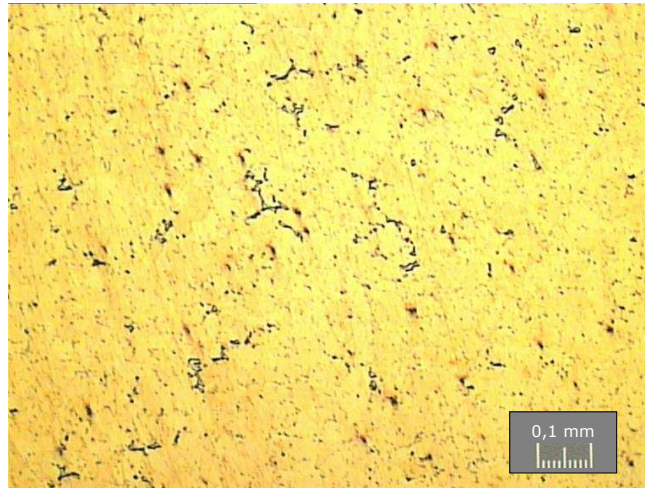
*Fig.9.2.9.3 Representación esquemática del ciclo de recocido trabajado en frío que muestra los efectos sobre las propiedades mecánicas y la microestructura*

## 9.2.10 Recocido contra acritud



*Fig. 9.2.10. Recocido contra acritud: izquierda (x500) y derecha (x1000)*





*Fig. 9.2.10. Recocido contra acritud: (x100)*

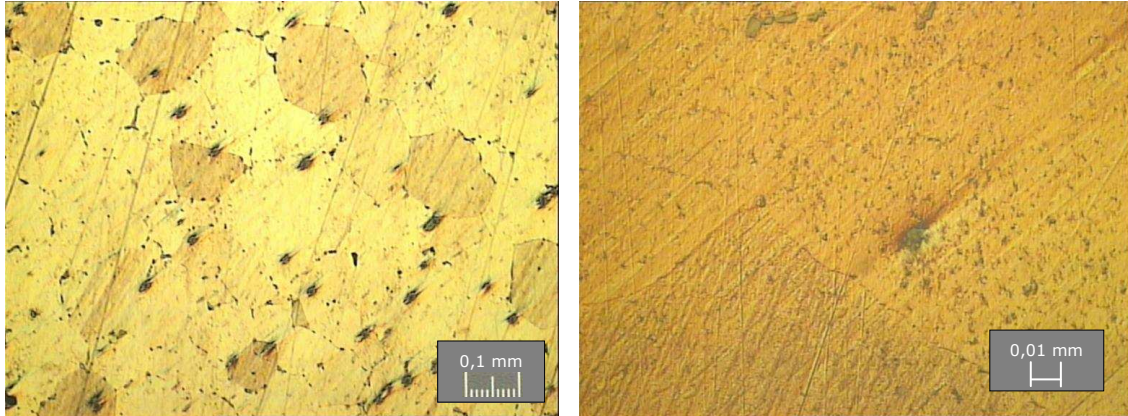
Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 113,58 HV
- Características microestructurales: grano pequeño

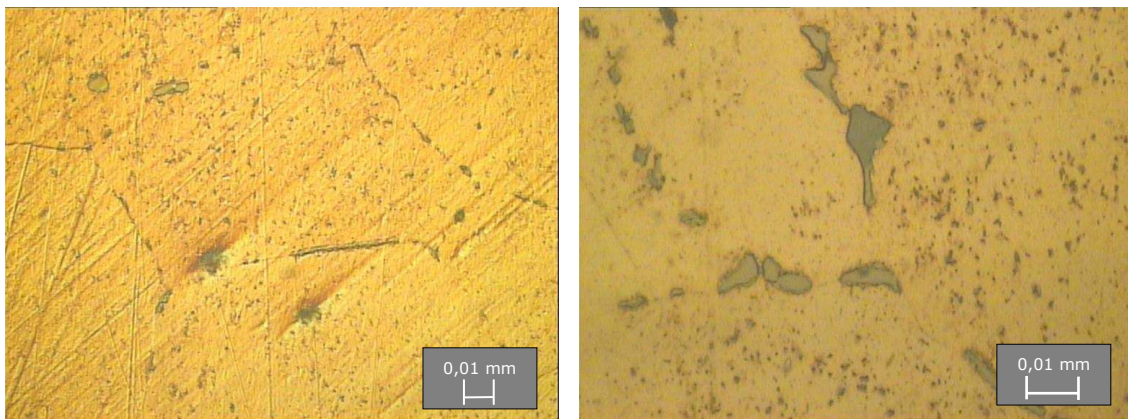
El recocido contra acritud es un tratamiento realizado a la pieza de suministro, este tratamiento se utiliza en bronce que han sido estirados y laminados en frío que han perdido la tenacidad y se han endurecido, para devolverles la ductilidad inicial.

En la micrografía se observa un grano pequeño, sin acumulaciones en los bordes de grano y con unos precipitados dispersos y pequeños. Es un recocido que, como se ha comentado, busca devolver la ductilidad a la pieza, por ello la dureza ha disminuido.

### 9.2.11 Recocido de homogeneización



*Fig. 9.2.11.1. Recocido de homogeneización: izquierda (x100) y derecha (x500)*



*Fig. 9.2.11.2. Recocido de homogeneización: izquierda (x500) y derecha (x1000)*

Partiendo de los siguientes resultados obtenidos:

- Valor de dureza media: 109,70 HV
- Características microestructurales: grano grueso con precipitados en su interior.

Este recocido es un tratamiento que se realiza a la pieza de suministro para obtener una muestra con una homogeneidad química, es decir se busca eliminar posibles heterogeneidades producidas en la solidificación.

Se trata de un grano con mucha fase precipitada en su interior y no en los bordes de grano lo que fomentaría grietas intergranulares. Tiene dos tipos de precipitados, unos gruesos y los otros finos, y estos están dispersos por todo el grano, aunque precipitan más en los exteriores de estos. Esto



puede producir un aumento de la dureza, pero el grano grueso, una disminución de esta, por ello el valor obtenido en el ensayo de microdureza nos es muy elevado.

## 10 Conclusiones

A continuación se van a enumerar las conclusiones más relevantes a las que se han llegado después de los ensayos realizados:

1. Respecto a las conclusiones de los temple en el bronce, conforme se aumenta el tiempo de mantenimiento del temple se aumenta el tamaño del grano y con ello se disminuye la dureza.
2. Con en el revenido en los bronce obtenemos piezas más duras que las templadas pero más frágiles que la de suministro.
3. Tanto el temple como el revenido no mejoran las propiedades mecánicas notablemente. Por ello en la industria del bronce no se utilizan, y en cambio se utiliza la deformación en frío para modificar las propiedades mecánicas.
4. A nivel industrial los únicos tratamientos térmicos que se utilizan en los bronce son los recocidos, para rebajar tensiones, homogeneizar las muestras químicamente y aumentar la ductilidad.
5. Como conclusión final en los bronce no se mejoran las propiedades mecánicas con los tratamientos térmicos (temple y revenido), a nivel industrial, se hacen tratamientos de deformación plástica para mejorar las propiedades mecánicas, aumentar la dureza y la resistencia. A menudo se realiza un posterior recocido; ya puede ser contra acritud, porque después de estas deformaciones han perdido la tenacidad y se han endurecido y con el recocido contra acritud podemos devolverles la ductilidad inicial; o de homogeneización, para destruir la heterogeneidad química; o de estabilización para destruir las tensiones internas producidas.

## 11 Bibliografía y documentación

- *"Materiales industriales"*  
Autor: José María Las Heras Esteban.  
Ed. Cedel. Año: 1981
- *"Ciencia de Materiales"*  
Autor: José María Las Heras Esteban.  
Ed. Donostiarra. Año: Julio 1991
- *"Ciencia de los materiales para la ingeniería"*  
Autores: Peter A. Thornton y Vito J. Colangelo.  
Traducción: Fernando Fournier Montiel.  
Ed. Prentice-Hall. Hispanoamericana, S.A. Año: 1987
- *"Ingeniería de materiales para industria y construcción"*  
Autor: J.M. Sanjosé, M<sup>a</sup>. Antonieta Madre Sediles, J. M. Franco Gimeno  
Ed. Mira Editores.
- *"Introducción a la metalurgia física"*  
Autor: Sydney Avner.  
Ed. Madrid del yg Castillo Año: 1983
- *"Formulario de resistencia y conocimiento de materiales para mecánicos"*  
Autor: Luis Pareto.  
Ediciones CEAC. Año: 1976
- *"Deformación plástica de los materiales. La forja y la laminación en caliente"*  
Autor: Jesús del Río.  
Ed. Gustavo Gili, S.A. Año: 1980



- *"Biblioteca Atrium de la herrería. Forja y fundición"*

Autor: Ángel Corral Miquel

Ed. Oceano grupo editorial, S.A.

#### Páginas webs consultadas

- <http://www.scribd.com>
- <http://www.mitecnologico.com>
- [http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/metales-antiguedad.html?x1=20070822klpingtcn\\_31.Kes](http://www.kalipedia.com/tecnologia/tema/metales-antiguedad.html?x1=20070822klpingtcn_31.Kes)
- [www.bronce.biz](http://www.bronce.biz)
- <http://descubrimientos-famosos.blogspot.com/2009/09/el-bronce.html>